

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

**CARACTÉRISATION D'UN CANAL MINIER SOUTERRAIN EN UTILISANT DES ANTENNES À
POLARISATION CIRCULAIRE**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

LAMIA ARABI

Janvier 2018



Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur Mourad Nedil, professeur à l'université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) pour la qualité de l'encadrement dont il m'a fait bénéficier, et le temps qu'il m'a consacré pour diriger ce mémoire.

Je remercie, Monsieur Nahi Kandil professeur à l'université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) pour ses encouragements qui ont mené à la finalisation de mon projet de maîtrise.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Moulay Hassan El-Azhary, étudiant en doctorat pour son soutien, sa disponibilité et ses conseils précieux. Il a été toujours disponible pour répondre à mes questions.

Un très grand merci à Monsieur Mohamed Lamine Seddiki, étudiant à la maîtrise et tous les étudiants du LRTCS pour leur aide et leur soutien.

Je tiens à remercier, mon mari pour son amour, sa patience et son soutien durant toute ma maîtrise.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	II
RÉSUMÉ	XI
ABSTRACT.....	XII
CHAPITRE.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Problématique.....	2
1.2 But de la recherche	3
1.3 Méthodologie de la recherche	3
1.4 Structure du mémoire	3
1.5 Publications	4
CHAPITRE.2 ÉTAT DE L'ART.....	5
2.1 Systèmes MIMO.....	5
2.1.1 Le canal MIMO.....	5
2.1.2 La matrice du canal	6
2.1.3 La corrélation entre les liens MIMO	7
2.1.4 La capacité du canal MIMO.....	8
2.2 Les paramètres du canal	10
2.2.1 La réponse impulsionnelle	10
2.2.2 L'étalement du retard (RMS) :	11
2.2.3 La bande de cohérence	12
2.2.4 L'affaiblissement de parcours (path loss) :	13
2.3 Conclusion.....	13

CHAPITRE.3 LES ANTENNES	14
3.1 Introduction	14
3.2 Définition de l'antenne	14
3.3 Caractéristiques générales d'une antenne.....	14
3.3.1 Diagramme de rayonnement	15
3.3.2 L'angle de l'ouverture	15
3.3.3 La directivité	16
3.3.4 Le gain.....	16
3.3.5 Le rendement.....	17
3.4 Polarisation.....	17
3.4.1 Antenne à polarisation circulaire	18
3.5 Conclusion.....	23
CHAPITRE.4 CARACTÉRISATION DU CANAL DANS UNE MINE SOUTERRAINE UTILISANT DES ANTENNES PATCH À POLARISATION CIRCULAIRE.....	24
4.1 Introduction	24
4.2 Mesures expérimental.....	25
4.2.1 Description de l'environnement souterrain	25
4.2.2 Procédures de mesure.....	26
4.3 Comparaison entre les résultats de mesure des antennes à polarisation circulaire et les antennes patch conventionnelles à polarisation rectiligne pour le système SISO	30
4.3.1 La réponse impulsionnelle	30
4.3.2 L'affaiblissement de parcours (Path loss).....	31

4.3.3	La bande de cohérence et l'étalement des retards (RMS delay spread)...	33
4.3.4	La capacité du canal.....	34
4.4	Comparaison entre les résultats de mesure des antennes à polarisation circulaire et les antennes patch conventionnelles à polarisation rectiligne pour le système MIMO 2X2.....	35
4.4.1	La réponse impulsionnelle	35
4.4.2	L'affaiblissement de parcours (Path loss).....	36
4.4.3	La bande de cohérence et l'étalement des retards (RMS delay spread)...	38
4.4.4	La capacité du canal.....	39
4.4.5	Facteur de Rice.....	41
4.5	Comparaison entre les résultats de mesure des antennes à polarisation circulaire et les antennes patch conventionnelles à polarisation rectiligne pour le système MIMO 2X2 pour un alignement de 90 degrés (dépolariation de 90 degrés).	
	43	
4.5.1	La réponse impulsionnelle	43
4.5.2	L'affaiblissement de parcours (Path loss).....	44
4.5.3	La capacité du canal.....	45
4.5.4	La bande de cohérence et l'étalement des retards (RMS delay spread)...	46
4.6	Conclusion.....	47
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		48
RÉFÉRENCES.....		50

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Schéma bloc d'un système MIMO [1].....	6
Figure 2.2 Capacités en fonction du SNR [6]	9
Figure 2.3 réponse impulsionnelle d'un canal minier [4]	11
Figure 3.1 Représentation du diagramme de rayonnement de l'antenne [10]	15
Figure 3.2 Le diagramme de rayonnement et l'angle d'ouverture [8]	16
Figure 3.3 Direction du champ électromagnétique [9].	18
Figure 3.4 Antenne à polarisation circulaire à l'aide d'un polariseur.....	18
Figure 3.5 Photo du réseau d'antennes patch à polarisation circulaire fabriquée au laboratoire LRTCS.....	19
Figure 3.6 Réseau d'antennes Patches tronquées à polarisation circulaire.....	20
Figure 3.7 Paramètres S mesurés pour l'antenne MIMO à polarisation circulaire	21
Figure 3.8 Évolution fréquentielle du taux d'ellipticité simulé.	22
Figure 3.9 Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2.4 GHz.....	22
Figure 4.1 Plan de la mine au niveau 90m à la cité de l'Or	25
Figure 4.2 photo de la galerie minière	26
Figure 4.3 Procédure expérimentale utilisée pour les mesures.	27
Figure 4.4 photo de l'analyseur de réseau vectoriel (VNA)	28
Figure 4.5 Fichier des mesures.....	29
Figure 4.6 La réponse impulsionnelle du canal (cas des antennes patch à polarisation circulaire)	31
Figure 4.7 La réponse impulsionnelle du canal (cas des antennes patch à polarisation rectiligne)	31
Figure 4.8 Évanouissement de parcours et la régression linéaire pour le système SISO- patch à polarisation circulaire	32
Figure 4.9 Évanouissement de parcours et la régression linéaire pour le système SISO- patch à polarisation rectiligne	32

Figure 4.10 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour SISO- patch à polarisation circulaire.....	33
Figure 4.11 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour SISO- patch à polarisation rectiligne.....	34
Figure 4.12 Capacité SISO-patch circulaire (LOS) en fonction de la distance	34
Figure 4.13 Capacité SISO-patch rectiligne (LOS) en fonction de la distance	35
Figure 4.14 Réponse impulsionnelle (pour le cas de l'antenne patch à polarisation circulaire)	36
Figure 4.15 Réponse impulsionnelle pour le cas de l'antenne patch à polarisation rectiligne.....	36
Figure 4.16 Affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système MIMO- patch à polarisation circulaire.....	37
Figure 4.17 Affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système MIMO- patch à polarisation rectiligne.....	38
Figure 4.18 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour MIMO- patch à polarisation circulaire.....	39
Figure 4.19 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour MIMO- patch à polarisation rectiligne.....	39
Figure 4.20 Capacité MIMO-patch circulaire (LOS) en fonction de la distance	40
Figure 4.21 CDF de la capacité MIMO-Patch circulaire (LOS) pour les quinze distances	40
Figure 4.22 Capacité MIMO-patch rectiligne (LOS) en fonction de la distance	41
Figure 4.23 CDF de la capacité MIMO-Patch rectiligne (LOS) pour les quinze distances	41
Figure 4.24 Facteur de Rice pour MIMO patch à polarisation circulaire	42
Figure 4.25 Facteur de Rice pour MIMO patch à polarisation rectiligne	42
Figure 4.26 Réponse impulsionnelle pour le cas de l'antenne patch à polarisation circulaire.....	43

Figure 4.27 Réponse impulsionnelle pour le cas de l'antenne patch à polarisation rectiligne.....	44
Figure 4.28 Affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système MIMO- patch a polarisation circulaire.....	44
Figure 4.29 Affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système MIMO- patch à polarisation rectiligne.....	45
Figure 4.30 Capacité MIMO-patch circulaire (LOS) en fonction de la distance.....	45
Figure 4.31 Capacité MIMO-patch rectiligne (LOS) en fonction de la distance.....	46
Figure 4.32 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour MIMO- patch à polarisation circulaire.....	46
Figure 4.33 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour MIMO- patch à polarisation rectiligne.....	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Paramètres de mesures	27
Tableau 4.2 L'équipement utilisé.....	28
Tableau 4.3 l'exposant de l'affaiblissement pour les deux types d'antenne.....	37

RÉSUMÉ

Plusieurs compagnies minières au Canada investissent dans le domaine de communication sans fils afin d'assurer la sécurité des mineurs et la communication entre ces derniers et le centre d'exploitation, augmenter la production et le contrôle automatique des machines. Cependant, la mine souterraine est un environnement complexe dont les galeries ont une géométrie non uniforme. Ceci entraîne des réflexions multiples qui affectent le signal radio.

Pour éviter ce problème, on propose l'utilisation de l'antenne patch à polarisation circulaire qui a retenu toute notre attention. En effet cette dernière présente des avantages prometteurs tels que; l'augmentation du débit en utilisant le sens de polarisation sur le même canal de propagation et l'augmentation des chances d'avoir une bonne liaison dans un système de communication perturbé par des défauts de polarisation, des réflexions multiples dues à des obstacles et les parois non uniformes dans une galerie minière.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier la caractérisation d'un canal minier souterrain en utilisant des antennes patch à polarisation circulaire qui fonctionnent à une fréquence de 2,4 GHz, ainsi que, déterminer les performances des systèmes de communication SISO (Single Input Single Output) et MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Pour réaliser cette étude, des séries de mesures ont été effectuées dans la mine citée de l'Or au niveau 90 mètres (sous-sol), pour une visibilité directe (LOS) en utilisant des antennes patch à polarisation circulaire et des antennes patch à polarisation rectiligne pour les techniques SISO et MIMO.

ABSTRACT

Several mining companies in Canada are investing in the field of wireless communication to ensure the safety of miners, communication between miners and the operations center and to increase production and automatic machine control.

However, the underground mine is a complex environment whose galleries have a non-uniform geometry. This leads to multiple reflections that affect the radio signal.

To avoid this problem, we propose the use of the circular polarization patch antenna which has caught our attention by the fact that it has promising advantages such as; the increase in the rate of use in the direction of polarization on the same propagation channel and the increase of the chances of having a good link in a communication system disturbed by polarization defects, multiple reflections due to obstacles and the non-uniform walls in a mining gallery.

The work presented in this thesis consists in studying the characterization of an underground mining channel using circular polarization patch antennas that operate at a frequency of 2.4 GHz, as well as determining the performance of SISO communication systems (Single Input Single Output) and MIMO (Multiple Input Multiple Output).

To carry out this study, measurement campaigns were carried out in the gold mine at the 90-meter level (Underground), for a line-of-sight (LOS) using circular polarization patch antennas and linear polarization patch antennas for SISO and MIMO techniques.

CHAPITRE.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pour les systèmes de communication sans fil, l'antenne est un élément très important qui permet la transformation d'une onde électrique en une onde électromagnétique et vice versa, d'autre part, les antennes assurent aussi la transmission d'énergie et sa propagation dans l'espace.

Les communications sans fil sont maintenant employées dans les mines souterraines. En effet, de nombreuses recherches ont été effectuées pour faciliter son exploitation, dont une grande partie est pour améliorer la qualité de transmission par l'augmentation de la capacité du canal. Une des solutions technologiques qui répondent aux besoins de la transmission sans fil dans l'environnement minier sous terrain, un concept est apparu en 1996. Il s'agit d'une technique qui permet de transmettre l'information selon un plan basé sur plusieurs antennes, appelé MIMO ``multiples émetteurs, multiples récepteurs``.

Quel que soit le type d'antenne, le but est d'améliorer les performances du système et assurer l'augmentation de la bande de fréquence en rayonnement, en polarisation, aussi l'augmentation de la directivité et la réduction de l'encombrement et le coût [1]. Parmi ces antennes, on s'est intéressé par celles qui fonctionnent en polarisation circulaire dans laquelle l'extrémité du vecteur électrique fait un cercle. Ce type d'antenne présente plusieurs avantages comme l'augmentation du débit sur une même bande de fréquence en utilisant les sens de rotation de la polarisation circulaire [2].

Plusieurs travaux de recherches ont été menées pour étudier la caractérisation d'un canal de propagation en utilisant plusieurs types d'antenne dans la bande de fréquence 2,4 GHz. Cependant, il existe toujours le problème de la forme de la galerie minière et la présence des machines d'exploitation minière qui affectent la qualité du signal. Les antennes à polarisation circulaire ont des avantages par rapport à celles avec la polarisation rectiligne dans un environnement minier, surtout quand le signal reçu peut comporter un mélange de toutes sortes de polarisations dues aux multiples réflexions.

Le but de notre projet de recherche est d'évaluer les caractéristiques du canal de propagation souterrain multi-émetteur multi-récepteur (MIMO) à 2,4 GHz en utilisant des antennes à polarisation circulaire.

1.1 Problématique

Les systèmes de communication sans fil dans les mines souterraines ont pour objectif de fournir des services fiables afin d'améliorer la productivité et la sécurité des mineurs. Cependant, comme dans tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes dus aux bruits et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission, des propriétés de l'antenne et à l'environnement autour de l'antenne. Ce dernier aura une grande influence sur la propagation des ondes électromagnétiques tel que l'environnement minier souterrain. Entre l'émetteur et le récepteur, les ondes radio subissent des trajets multiples liés aux phénomènes électromagnétiques tels que ; les réflexions, les diffractions, la dépolarisation, etc.

La capacité du système de communication sans fil SISO (une antenne en émission et une en réception) est limitée par la bande de fréquence [3] et des évanouissements dus aux multiples trajets. Pour éviter ces limitations, il est recommandé d'employer plus qu'une antenne en émission et en réception MIMO, parce que les multiples trajets ont été considérés comme un avantage pour les systèmes MIMO. Cependant, même les systèmes MIMO dans les milieux confinés tel qu'une mine souterraine sont sensibles aux problèmes de dépolarisation et présences d'obstacles. Dans ce cas, il est nécessaire de s'occuper de la qualité de la communication sans fil en introduisant des antennes à polarisation circulaire.

En effet, les antennes fonctionnant en polarisation circulaire présentent plusieurs avantages : [2]

- ✓ La suppression du réglage du positionnement entre l'antenne émettrice et réceptrice dans les systèmes de communication.
- ✓ La possibilité d'augmenter le débit en utilisant le sens de polarisation (droite ou gauche) sur un même canal de propagation.

- ✓ L'augmentation des chances d'avoir une bonne liaison dans un système de communication perturbé par des réflexions multiples dues à des obstacles (tel que les mines souterraines).

1.2 But de la recherche

La connaissance du canal de transmission dans un environnement minier souterrain est essentielle pour la conception des systèmes de transmission qui répond aux besoins des mineurs. Le but de ce projet de maîtrise est d'effectuer l'étude de la caractérisation du canal de propagation d'un canal MIMO à 2,4 GHz dans un environnement minier souterrain en utilisant des antennes à polarisation circulaire. Ceci est dans le but d'évaluer et comparer les paramètres du canal (tel que la capacité du canal) en utilisant les deux types d'antennes (à polarisation circulaire et à polarisation rectiligne (antenne patch conventionnelle)).

1.3 Méthodologie de la recherche

Pour étudier la caractérisation du canal de propagation dans un environnement minier souterrain, on a suivi la méthodologie suivante :

- ✓ Faire des mesures dans un environnement minier souterrain à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel VNA pour extraire le coefficient de transmission S_{21} et déterminer ainsi la réponse fréquentielle du canal.
- ✓ À l'aide du logiciel de simulation (MATLAB), nous avons déterminé les différents paramètres qui caractérisent le canal tels que : l'atténuation de parcours, la bande de cohérence, l'étalement des retards (RMS delay spread), et la Capacité du canal.
- ✓ Comparer les résultats avec celles obtenus en utilisant des antennes patch conventionnelles à polarisation rectiligne.

1.4 Structure du mémoire

Ce mémoire est réparti sur quatre chapitres :

Le chapitre 2 propose l'état de l'art sur les systèmes MIMO et la caractérisation ainsi que les différents paramètres du canal MIMO.

Le chapitre 3 présente quelques généralités sur le principe de fonctionnement des antennes et leur caractéristique telles que ; le diagramme de rayonnement, le gain, la directivité et la polarisation circulaire de l'antenne patch tronquée.

Le chapitre 4 décrit l'étude expérimentale utilisée durant les mesures pour déterminer les paramètres du canal à 2.4 GHz du canal de propagation dans une mine souterraine. Une étude comparative des performances a été effectuée pour les deux types d'antenne (antenne à polarisation circulaire et antenne patch à polarisation rectiligne).

1.5 Publications

1. **L .Arabi**, M.E. El Azhari, M.Nedil, N.Kandil, M.L. Seddiki, L.Talbi "2.4 Ghz Radio-Channel Characterization Of An Underground Mine Using Patch Antennas" 2017 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (APSURSI), San Diego. (Accepté)
2. **L .Arabi**, M.E. El Azhari, M.Nedil, N.Kandil, M.L. Seddiki, L.Talbi." Radio-Channel Characterization of an Underground Mine using circularly polarized antennas at 2.4 GHz" 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), San Diego. (Accepté)

CHAPITRE.2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Systèmes MIMO

2.1.1 Le canal MIMO

La forte présence du phénomène de trajet multiple dans un milieu confiné en utilisant le système de transmission conventionnel SISO (une antenne en émission et une antenne en réception) est un problème majeur qui rend le signal de transmission faible. Ceci a poussé les recherches pour trouver d'autres solutions dans le but d'améliorer la capacité du système sans fil. Cependant, plusieurs études ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes en émission ainsi qu'en réception (technologie MIMO) rend les trajets multiples un avantage pour augmenter la capacité du canal. La technologie MIMO (Figure 2.1) est connue pour améliorer de manière significative la fiabilité des systèmes sans fil avec la réduction du taux d'erreur binaire (BER), l'augmentation du rapport signal sur bruit (SNR) et l'amélioration de la capacité du système [1].

Contrairement aux systèmes SISO, il ne s'agit pas de sélectionner une antenne de réception en fonction de signal sur bruit, mais plutôt des signaux différents sont envoyés à des différentes antennes d'émission [4].

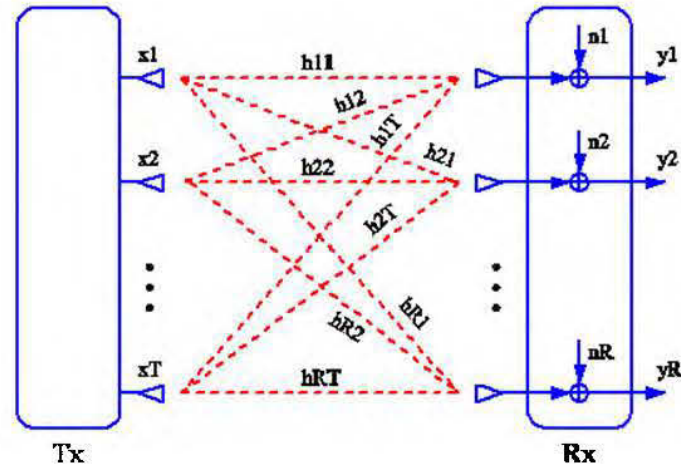


Figure 2.1 Schéma bloc d'un système MIMO [1]

2.1.2 La matrice du canal

Pour la technique MIMO, l'expression d'un signal reçu $Y(t)$ constitué de nombre N_T antennes en émission et N_R antennes en réception est donnée par l'équation suivante [4] :

$$Y(t) = H(t) X(t) + b(t) \quad (2.1)$$

Où $X(t)$ est le vecteur d'émission de taille $(N_T \times 1)$, $Y(t)$ est le vecteur de réception de dimension $(N_R \times 1)$, $b(t)$ est le vecteur de bruit qui est supposé blanc, additif gaussien et $H(t)$ est la matrice des réponses impulsionnelle de taille $(N_T \times N_R)$, dont chaque élément $h_{ij}(t)$ est la réponse impulsionnelle entre $j^{\text{ième}}$ émetteur et $i^{\text{ième}}$ récepteur. La matrice $H(t)$ est exprimée comme la somme des matrices k de canal H_k avec un retard de τ_k par l'équation suivante [1] :

$$H(t) = \sum_{k=1}^K H_k \delta(t - \tau_k) \quad (2.2)$$

Et la matrice H_k du canal prendra la forme [5] :

$$H_K = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N_R 1} & h_{N_R 2} & & h_{N_R N_T} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La matrice du canal est très utile pour calculer les paramètres caractéristiques d'un canal MIMO, tels que la corrélation entre les liens MIMO et la capacité du canal.

2.1.3 La corrélation entre les liens MIMO

L'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception ajoute la dimension spatiale au canal de propagation [4]. Cependant, cette dimension (distance entre les antennes) engendre des liens MIMO corrélés. Dans un canal non sélectif en fréquence, la matrice de corrélation s'écrit de la manière suivante [4] :

$$R_H = E [\text{vec}(H)\text{vec}(H)^H] \quad (2.4)$$

Où E est l'opérateur espérance mathématique, $\text{vec}(\cdot)$ est l'opérateur "mis en colonne", et $H(\cdot)$ est l'opérateur Hermitien correspondant à deux opérations : application du conjugué puis de la transposée à la matrice considérée.

Il y a deux critères de corrélation η dont le premier est de nature statique défini par [4] :

$$\eta = \frac{\text{COV}(X,Y)}{\sqrt{\text{VAR}(X).\text{VAR}(Y)}} \quad (2.5)$$

Le deuxième critère concerne la corrélation physique qui est exprimée comme suit [5]:

$$\eta_\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K \frac{\text{MAX}(R_{XY})}{\sqrt{R_{XX}(0).R_{YY}(0)}} \quad (2.6)$$

Avec X et Y appartenant à $\{h_{ij}(\tau)\}$, et K est le nombre de réalisations.

2.1.4 La capacité du canal MIMO

Shannon a démontré que lorsqu'on utilise un codage élaboré, il existe un débit d'information au-dessous duquel la probabilité d'erreur est vraiment faible. Cependant, au-dessus de ce débit, la probabilité d'erreur ne peut pas être annulée. Cette grandeur s'appelle la capacité [1].

Donc, Shannon a émis un théorème de la capacité maximale d'un signal reçu lors d'une transmission. Ce théorème affirme qu'il existe une capacité de canal gaussien tel que [6] :

$$C_N = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + 2 \frac{E_N}{N_0} \right) \quad (2.7)$$

$\frac{E_N}{N_0}$: rapport signal à bruit (par bit)

Il est possible de présenter la capacité sous la forme de théorème de Shannon –Harley tel que [6] :

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (2.8)$$

Où B est la bande passante et C représente la capacité en débits par secondes (Figure 2.2)

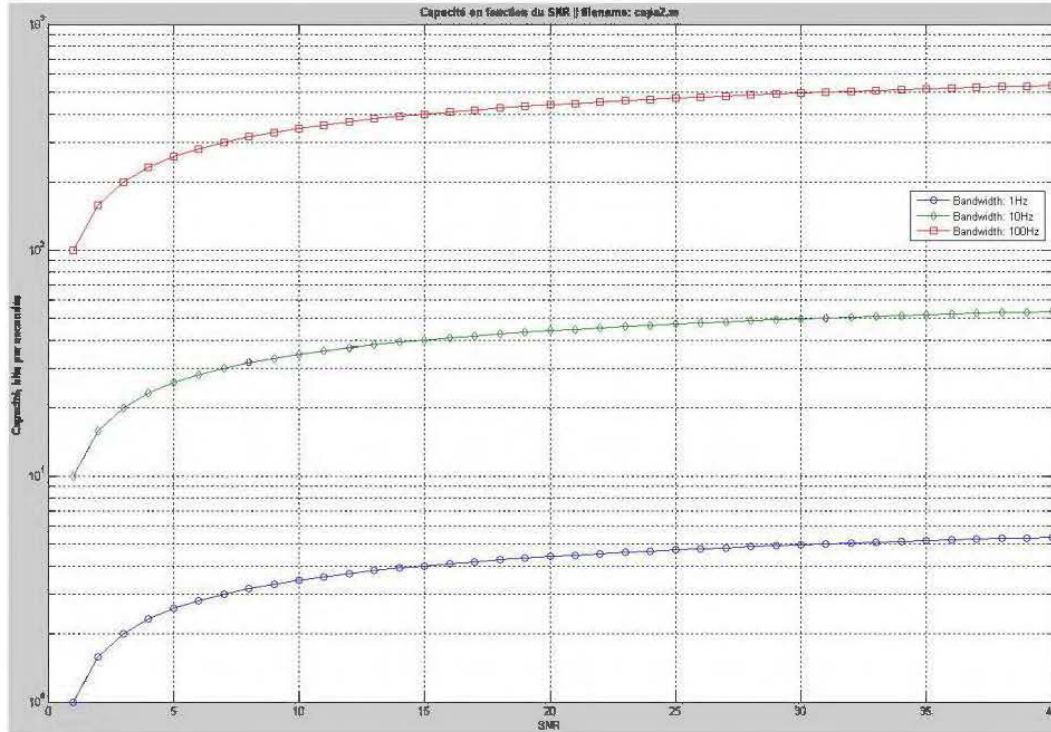


Figure 2.2 Capacités en fonction du SNR [6]

La capacité du canal MIMO est le débit maximal pour le transfert de l'information à travers ce canal en bits/s/Hz. La capacité MIMO est définie, donc, par l'équation suivante [1] :

$$C_{MIMO}[\text{bps/Hz}] = \log_2(\det[I_n + \frac{SNR_{av}}{m} HH^*]). \quad (2.9)$$

H est la matrice normalisée du canal de dimension $m \times n$ ($m \geq n$). SNR_{av} est le rapport de signal sur bruit (SNR) moyen, I_n est la matrice d'identité $n \times n$ et $*$ représente la transposée du conjugué complexe.

La capacité évolue d'une valeur moyenne constante si la matrice H varie d'une manière aléatoire et rapide, la capacité moyenne s'exprime alors [7] :

$$C_{moy} = E[C] \quad (2.10)$$

Cependant, si H varie d'une manière quasi-statique, on peut atteindre la valeur supérieure de la capacité avec une probabilité de coupure [7] (capacité de coupure).

La capacité du canal MIMO s'exprime aussi en fonction des valeurs propre λ_i de la matrice H .

$$C = \sum_{k=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_t} \lambda_k \right) \quad (2.11)$$

2.2 Les paramètres du canal

Pour étudier la caractérisation d'un canal minier souterrain, il est nécessaire de définir les différents paramètres tels que : la réponse impulsionnelle, l'étalement du retard (RMS), la bande de cohérence et l'affaiblissement du parcours.

2.2.1 La réponse impulsionnelle

Le canal de propagation MIMO est décrit dans le domaine temporel par la réponse impulsionnelle $\mathbf{h}(\boldsymbol{\tau})$ dont $\boldsymbol{\tau}$ est le délai de différents trajets du signal transmis [1].

Généralement, le canal est variable dans le temps, donc, la réponse impulsionnelle du canal $\mathbf{h}(\boldsymbol{\tau}, t)$ dépend de deux variables τ et t comme montre la figure 2.3 [4]

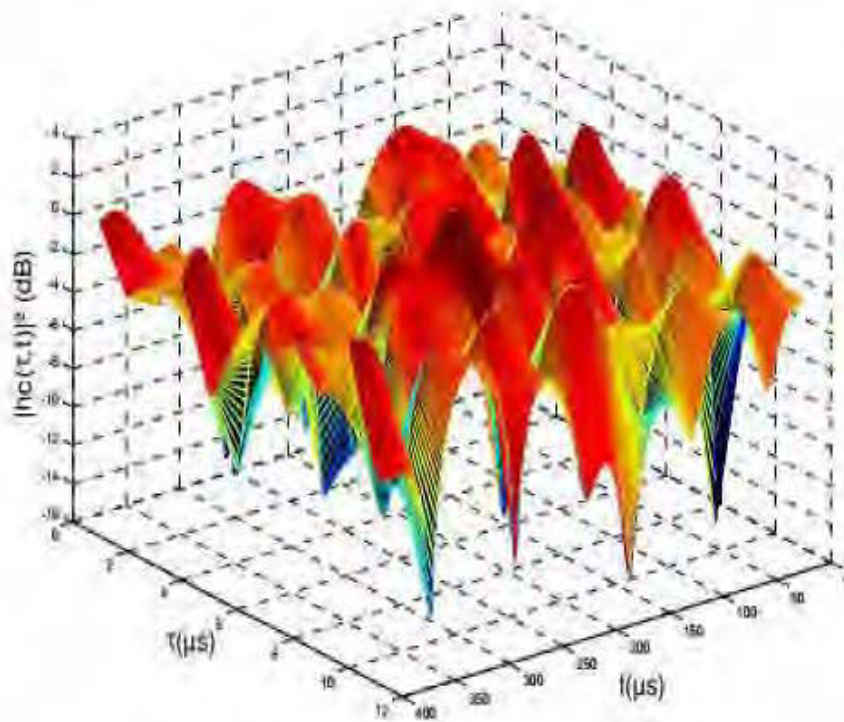


Figure 2.3 réponse impulsionnelle d'un canal minier [4]

Dans notre cas (caractérisation du canal dans la mine), on considère que le canal MIMO est quasi-statique [1]. Pour déterminer la réponse impulsionnelle du canal, il faut d'abord mesurer la réponse fréquentielle $H(f)$ à l'aide d'un analyseur de réseau (VNA). Afin de caractériser le canal de propagation, l'information importante est le coefficient de transfert S_{21} qui correspond à la fonction de transfert du canal $H(f)$ comme indique l'équation suivante [1]:

$$H(f) = |H(f)| e^{j\theta(f)} \quad (2.12)$$

Où $|H(f)|$ est l'amplitude du paramètre S_{21} mesuré par le VNA et $\theta(f)$ représente sa phase [1]. Les fonctions $h(\tau, t)$ et $H(f)$ sont reliées par la transformée de Fourier inverse (IFFT) de la fonction de transfert S_{21} .

2.2.2 L'étalement du retard (RMS) :

L'étalement des retards (RMS delay spread) quantifie les propriétés de dispersion temporelle d'un canal à multi-trajets. Il est représenté par la formule suivante [1] :

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2} \quad (2.13)$$

$\bar{\tau}$: le retard moyen

$\overline{\tau^2}$: le second moment du profil des retards des puissances

Le retard moyen est représenté par la formule suivante :

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i P_i(\tau_i) \tau_i}{\sum_i P_i(\tau_i)} \quad (2.14)$$

La valeur de l'étalement moyen du retard peut être considérée comme la « moyenne » du retard des trajets multiples

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_i P_i(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_i P_i(\tau_i)} \quad (2.15)$$

Où P_i est la puissance reçue (en unités linéaires), τ_i le temps d'arrivée.

2.2.3 La bande de cohérence

La bande de cohérence B_c est définie comme l'écart qui sépare deux composantes fréquentielles afin qu'elles soient complètement décorrelées. Un étalement important de délai réduit la bande de cohérence, et celle-ci relie l'étalement efficace du retard par la formule [1] :

$$B_c \simeq \frac{1}{\alpha \tau_{RMS}} \quad (2.16)$$

Où α est une constante qui dépend de la corrélation fréquentielle ou de phase.

➤ A 50% de corrélation

$$B_c \simeq \frac{1}{5 \tau_{RMS}} \quad (2.17)$$

➤ A 90% de corrélation

$$B_c \simeq \frac{1}{50 \tau_{RMS}} \quad (2.18)$$

2.2.4 L'affaiblissement de parcours (path loss) :

La propagation du signal transmis dans un milieu confiné tel qu'une mine souterraine engendre un affaiblissement ou la perte de la puissance du signal. L'affaiblissement du parcours est le rapport de la puissance transmise à une moyenne locale de la puissance reçue. Il est modélisé en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur Tx-Rx comme le montre l'équation [1] :

$$PL(d) = PL_{dB}(d_0) + 10.\alpha.\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (2.19)$$

$PL_{dB}(d_0)$: est la perte de trajet moyen à la distance de référence d_0 .

d : est la distance où l'affaiblissement de parcours est calculé.

α est l'exposant de l'affaiblissement de parcours (déterminée en utilisant la méthode de régression linéaire).

X : est une variable aléatoire gaussien (en dB)

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a introduit les différents paramètres qui caractérisent le canal de propagation MIMO. Ces paramètres jouent un rôle important dans l'évaluation des performances du système. Nous avons aussi introduit la définition de la capacité et les différents éléments qui affectent le canal tel que la corrélation, l'environnement, la position des antennes et la distance entre l'émetteur et le récepteur.

CHAPITRE.3 LES ANTENNES

3.1 Introduction

Dans un environnement minier, le canal est soumis aux problèmes qui limitent les performances du système dus aux propriétés de l'antenne, le bruit et les perturbations. Ce chapitre a pour but de présenter les différentes caractéristiques de l'antenne tels que; le diagramme de rayonnement, la directivité, le gain et la polarisation.

3.2 Définition de l'antenne

Le principal rôle de l'antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique et vice versa [2]. Cette conversion va permettre le transfert de l'information sans aucun support physique dont ce dernier est assuré par des ondes électromagnétiques à travers un canal de transmission entre l'émetteur et le récepteur.

Les antennes peuvent être classées en trois catégories [8] :

- Les antennes résonantes comme les antennes filaires (dipôle) et les antennes imprimées (patch).
- Les antennes à ouverture comme les cornets et les antennes à réflecteurs d'onde (antenne parabolique)
- Les antennes à fentes (demi ou quart d'onde)

3.3 Caractéristiques générales d'une antenne

Les principales caractéristiques de l'antenne sont :

3.3.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations des puissances rayonnées par l'antenne dans les différentes directions de l'espace (figure 3.1) [8]. À part les antennes omnidirectionnelles, on trouve que des antennes qui ne rayonnent pas leurs puissances de manière uniforme.

Dans le diagramme de rayonnement, il y a une direction maximale ou le lobe principal, dont la puissance rayonnée est concentrée, et les lobes secondaires ou l'énergie rayonnée est perdue.

La fonction caractéristique de rayonnement $F(\Theta, \Phi)$ de l'antenne est définie comme le rapport de la puissance transmise $P(\Theta, \Phi)$, pour une direction quelconque, à la puissance $P_{max}(\Theta, \Phi)$ pour une direction où le rayonnement est maximal [9] :

$$F(\Theta, \Phi) = \frac{P(\Theta, \Phi)}{P_{max}(\Theta, \Phi)} \quad (3.1)$$

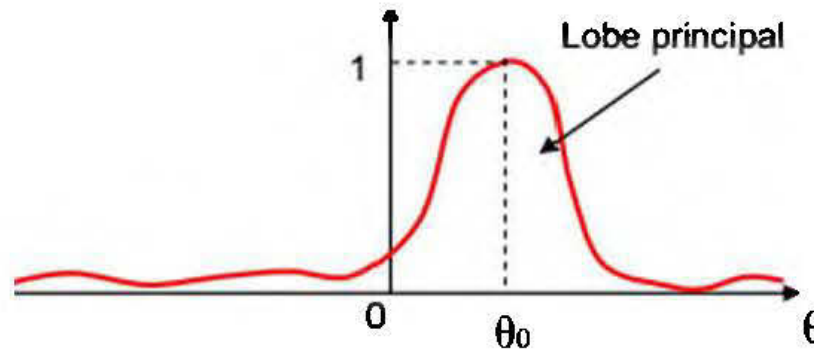


Figure 3.1 Représentation du diagramme de rayonnement de l'antenne [10]

3.3.2 L'angle de l'ouverture

L'angle d'ouverture représente la largeur du lobe principal ou la majeure partie de la puissance est rayonnée. Cette dernière est égale à la moitié de la puissance rayonnée

dans la direction de rayonnement maximale. La figure 3.2 présente le diagramme de rayonnement et l'angle d'ouverture [8].

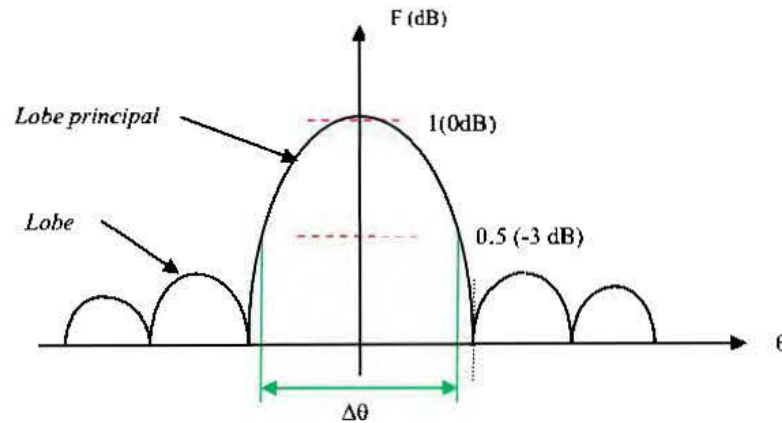


Figure 3.2 Le diagramme de rayonnement et l'angle d'ouverture [8]

L'angle $\Delta\theta$, présenté sur ce diagramme, est l'angle d'ouverture qui donne une idée précise sur la qualité du rayonnement.

3.3.3 La directivité

La directivité de l'antenne dans une direction (Θ, Φ) , est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle et la puissance que rayonnerait la source isotrope [9].

$$D(\Theta, \Phi) = \frac{P(\Theta, \Phi)}{\frac{P}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\Theta, \Phi)}{P} \quad (3.2)$$

La directivité nous montre la direction dont la puissance rayonnée est plus au moins meilleure que celle d'une antenne isotrope.

3.3.4 Le gain

Le gain de l'antenne dans une direction (Θ, Φ) est le rapport de la puissance rayonnée dans une direction donnée et la puissance que rayonnerait la source isotrope sans perte [9].

$$G(\Theta, \Phi) = \frac{P(\Theta, \Phi)}{P_0(\Theta, \Phi)} = 4\pi \frac{P(\Theta, \Phi)}{P_a} \quad (3.3)$$

Le gain égal à 1 ou 0 dB si l'antenne est omnidirectionnelle et sans perte. Il est exprimé en dB ou en dBi (dicible par rapport à l'antenne isotrope).

3.3.5 Le rendement

Le rendement d'une antenne η ou l'efficacité de rayonnement d'antenne est définie comme le rapport entre la puissance totale P qu'elle rayonne et la puissance d'alimentation P_a de cette antenne :

$$\eta = \frac{P}{P_a} \quad (3.4)$$

En comparant les équations de la directivité et le gain, on remarque que le rendement relie les deux [10] :

$$P = \eta P_a \Rightarrow G(\Theta, \Phi) = \eta D(\Theta, \Phi) \quad (3.5)$$

3.4 Polarisation

Il est généralement, possible de déterminer la polarisation d'une antenne par la direction du champ électrique. La majorité des antennes, à éléments rayonnants linéaires, ont une polarisation rectiligne. Cependant, il existe des antennes à polarisation circulaire ou la direction du champ électrique rayonné varie avec le temps (figure 3.3). En effet, si on schématise les positions du champ E , l'extrémité du vecteur décrit un cercle ou une ellipse [9].

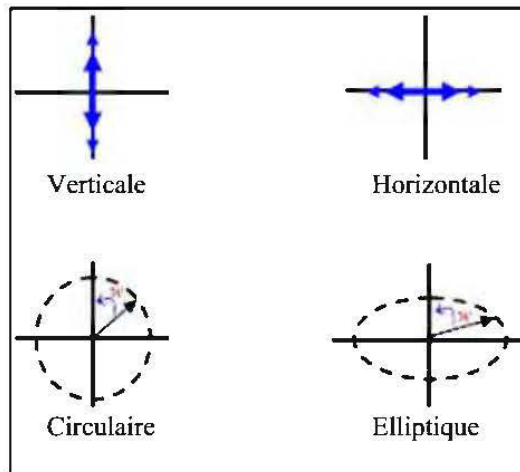


Figure 3.3 Direction du champ électromagnétique [9].

3.4.1 Antenne à polarisation circulaire

Dans ce travail, on s'intéresse aux antennes à polarisation circulaire et leurs performances. Il existe deux types d'antenne à polarisation circulaire. La première catégorie est une antenne à polarisation linéaire dont la polarisation change à l'aide d'un élément extérieur (polariseur) (figure 3.4).

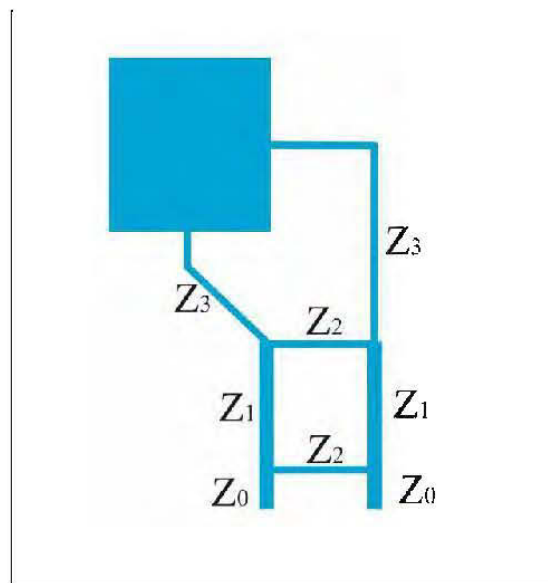


Figure 3.4 Antenne à polarisation circulaire à l'aide d'un polariseur

La deuxième est une antenne qui crée elle-même sa polarisation [2]. Le taux d'ellipticité ou **Axial Ratio (AR)** est parmi les principales caractéristiques pour les antennes à polarisation circulaire avec $AR < 3\text{dB}$; cette valeur est la valeur standard.

Il existe plusieurs solutions pour obtenir une antenne à polarisation circulaire. La plus simple et la moins coûteuse est d'utiliser une antenne patch excitée par une sonde d'excitation avec des éléments perturbateurs afin de créer les deux composants orthogonaux (E_θ et E_ϕ) du champ électrique. Ces deux composants doivent être en quadrature de phase. L'antenne utilisée dans ce travail a été réalisée au LRTCS et a pour but d'étudier et d'évaluer l'effet de l'antenne à polarisation circulaire pour les systèmes SISO et MIMO dans une galerie de mine souterraine. Cette antenne a été réalisée avec une polarisation circulaire comme le montre la figure 3.5.

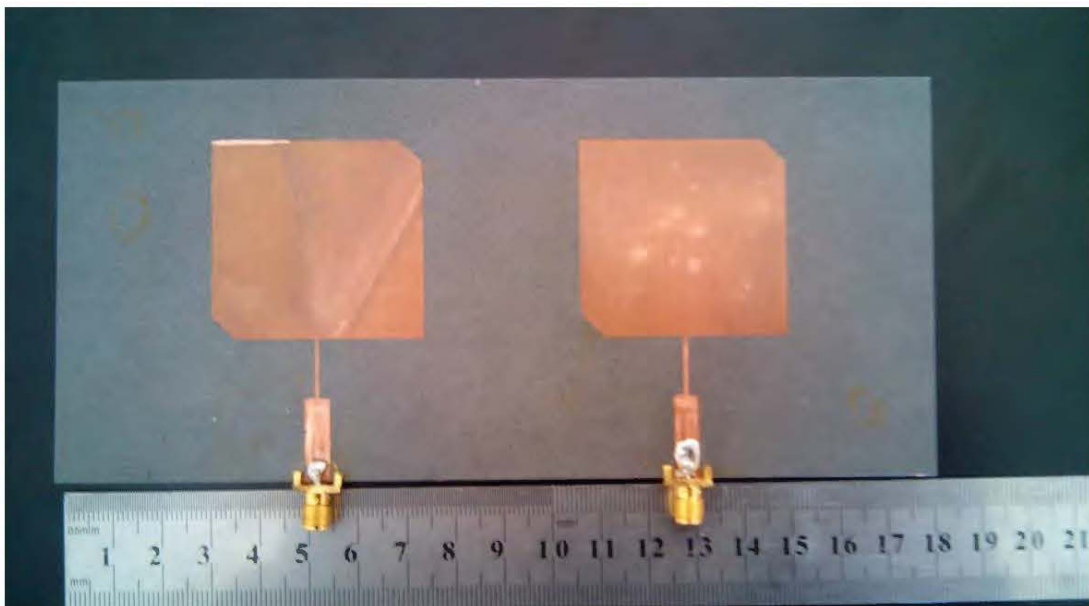


Figure 3.5 Photo du réseau d'antennes patch à polarisation circulaire fabriquée au laboratoire LRTCS.

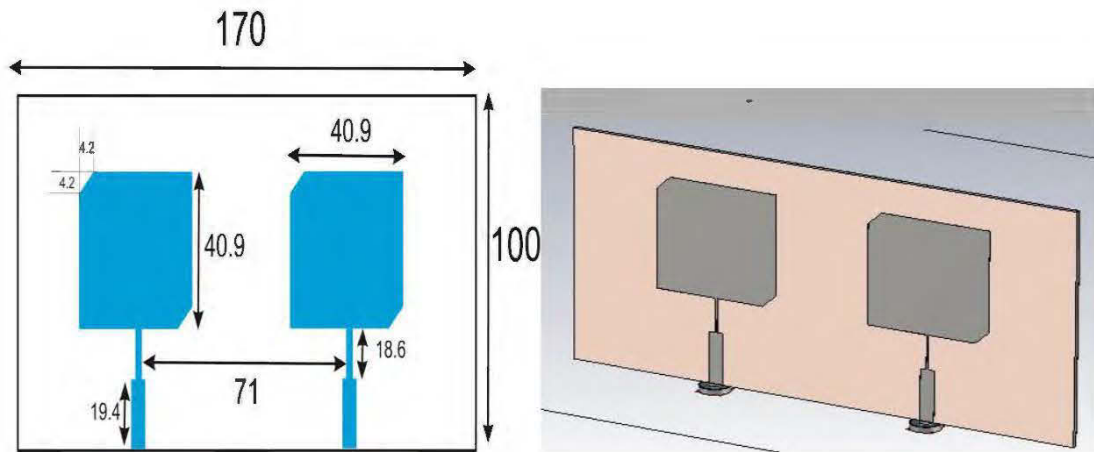


Figure 3.6 Réseau d'antennes Patches tronquées à polarisation circulaire.

Pour concevoir l'antenne de la figure 3.6, le logiciel de conception d'antenne **CSTMWS** (Computer Simulation Technology Microwave-studio) a été utilisé. En fait, c'est un patch rectangulaire tronqué pour créer la polarisation circulaire. Les dimensions optimales sont données comme suit :

La hauteur de l'antenne $l = 40,9 \text{ mm}$

La largeur de l'antenne $w = 40,9 \text{ mm}$

La troncation $t = 4.2 \text{ mm}$

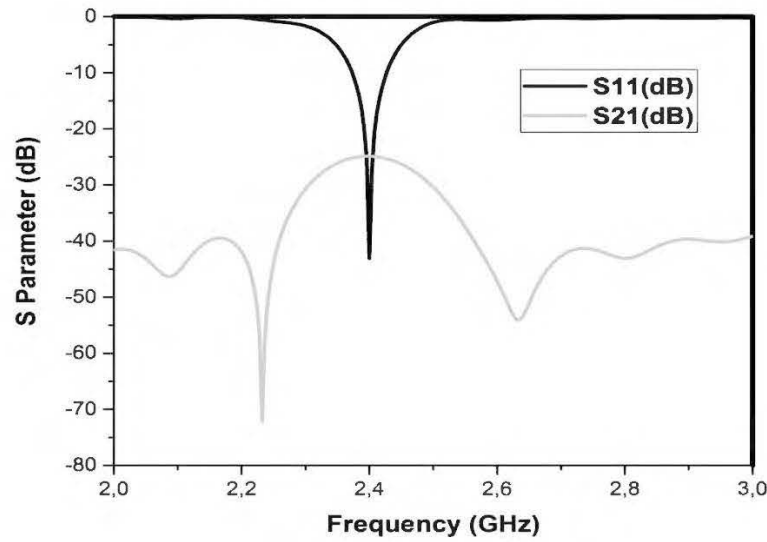


Figure 3.7 Paramètres S mesurés pour l'antenne MIMO à polarisation circulaire

La figure 3.7 présente les résultats de mesure des pertes de retour S_{11} et le couplage mutuel S_{21} . D'après ces résultats, on constate que S_{11} est inférieur à -10dB et le couplage mutuel est d'environ 25 dB.

Le taux d'ellipticité (ou l'Axial ratio) diminue lorsque le diamètre de l'antenne augmente. De ce fait, il faut choisir, donc, un diamètre suffisamment grand pour obtenir un taux d'ellipticité d'une antenne patch tronquée inférieur à 3 dB, cela met en évidence une meilleure polarisation circulaire. La figure 3.8 montre le taux d'ellipticité mesuré de l'antenne qu'on a utilisé dans ce projet pour la caractérisation du canal.

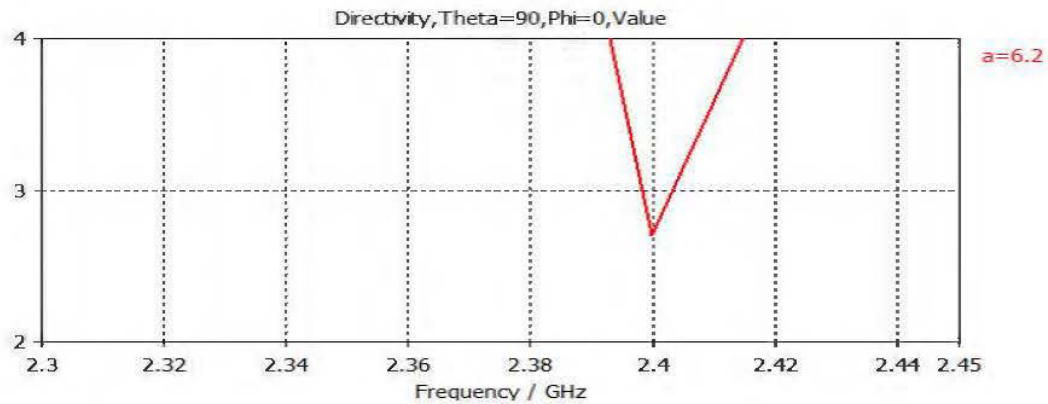


Figure 3.8 Évolution fréquentielle du taux d'ellipticité simulé.

La figure 3.9 montre le diagramme de rayonnement de l'antenne patch à polarisation circulaire pour une fréquence de résonance $F = 2,4$ GHz. Le diagramme de rayonnement est symétrique et la directivité égale à 6.6 dBi, le plan de coupe $\Phi = 90$ avec un gain de 6,6 dB et un niveau des lobes secondaires à 15,2 dB du lobe principal.

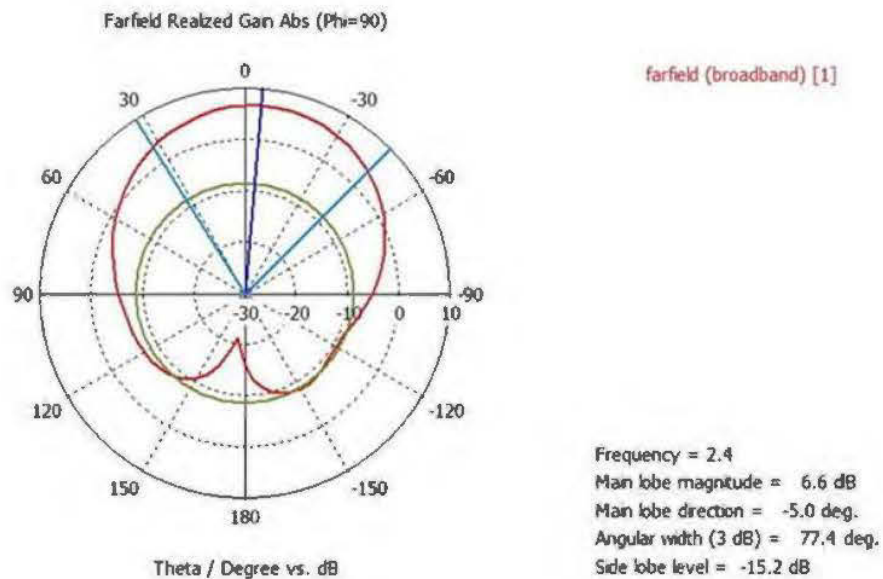


Figure 3.9 Diagramme de rayonnement de l'antenne à 2.4 GHz

3.5 Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les différents types d'antenne utilisée dans le domaine des télécommunications. Nous avons analysé les caractéristiques d'une antenne ainsi que les performances d'un réseau d'antenne à polarisation circulaire en utilisant des antennes patchs tronquées pour une fréquence de résonance de 2,4 GHz. La caractérisation du canal en utilisant ce type d'antenne sera traitée dans le chapitre 4.

CHAPITRE.4 CARACTÉRISATION DU CANAL DANS UNE MINE SOUTERRAINE UTILISANT DES ANTENNES PATCH À POLARISATION CIRCULAIRE.

4.1 Introduction

Dans un milieu confiné, tel que le tunnel ou la galerie minière (entre l'émetteur et le récepteur pour un système SISO), les ondes radio subissent des trajets multiples liés aux phénomènes électromagnétiques. Ces phénomènes sont d'autant plus complexes dans un environnement minier. Lors de la communication radio, cette imperfection du canal peut se traduire par des évanouissements profonds qui sont responsables de la dégradation du signal. Cette dégradation de la qualité du lien radio peut se traduire par la diminution considérable de la vitesse de transmission de données vu que l'étalement du retard (Delay Spread) du canal est important.

Les systèmes à antennes multiples, ou systèmes MIMO (Multi Input Multi Output) exploitent la dimension spatiale et les réseaux d'antennes pour transmettre plusieurs flux parallèles dans le même canal de fréquence. En effet, ils ont le potentiel d'augmenter la capacité du canal proportionnellement aux nombres d'antennes émettrices et réceptrices considérées, en particulier dans les environnements riches en multi-trajets tels que les mines souterraines.

Dans cette partie, on va déterminer, à la fréquence 2,4GHz, les performances et l'effet de la polarisation de l'antenne des systèmes de communication SISO et MIMO pour un canal de propagation dans une mine souterraine. Pour cela, deux différents types d'antenne ont été utilisés ; à savoir des antennes patchs à polarisation circulaire et des antennes patchs à polarisation rectiligne.

4.2 Mesures expérimental

4.2.1 Description de l'environnement souterrain

Des campagnes de mesures ont été effectuées dans la mine citée de l'Or au niveau 90 mètres sous-sol, avec une largeur d'environ 5m et d'une hauteur d'environ 2.45 m. C'est un environnement idéal pour les mesures de propagation radio dans des milieux confinés. Cette mine est composée essentiellement de parois rugueuses et d'un sol non uniforme. Le milieu est très humide avec une température autour de 8 °C tout le long de l'année. À vrai dire, ce milieu minier constitue un milieu idéal pour étudier la propagation à trajets multiples. Les figures 4.1 et 4.2 montrent respectivement le plan de la mine et la photo de la galerie minière où les mesures ont été effectuées.

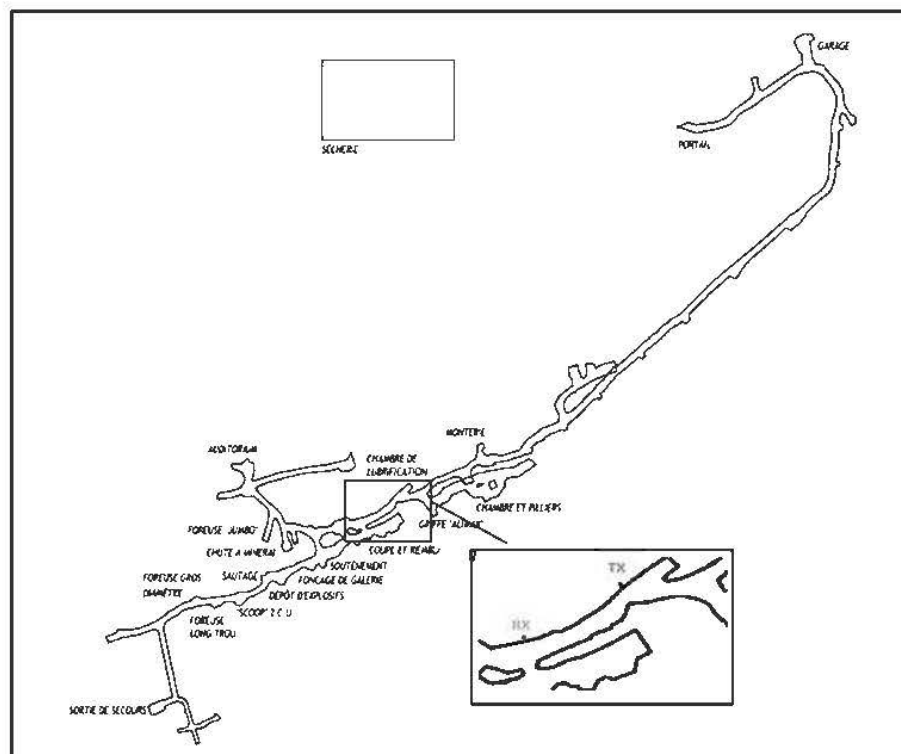


Figure 4.1 Plan de la mine au niveau 90m à la cité de l'Or



Figure 4.2 photo de la galerie minière

4.2.2 Procédures de mesure

Les mesures ont été effectuées dans une galerie minière en utilisant des antennes patch à polarisation circulaire et des antennes patch à polarisation rectiligne. Le système de mesure SISO est composé d'une antenne à l'émission et d'une autre à la réception pour les distances de 1 mètre à 15 mètres. Pour la technologie MIMO, le système de mesure est composé d'une paire d'antennes 2x2 à l'émission et d'une autre à la réception pour les mêmes distances. Un amplificateur de puissance (PA) à l'émission et un amplificateur à faible bruit (LNA) au niveau de la réception, et un analyseur de réseau vectoriel (VNA) qui permet de mesurer directement la fonction de transfert dans la plage de fréquence désirée (paramètre S_{21}). Durant les mesures, le canal de propagation a été considéré comme stationnaire et les antennes (T_x et R_x) fixées sur les panneaux à la même hauteur de 1,70 m. Pour caractériser le canal de propagation à grande échelle en ligne de vue (LOS ; Line-of-sight), le récepteur a été déplacé de la position fixe de l'émetteur, à un pas de 1 m sur une distance allant de 1 m à 15 m (Figure 4.3)

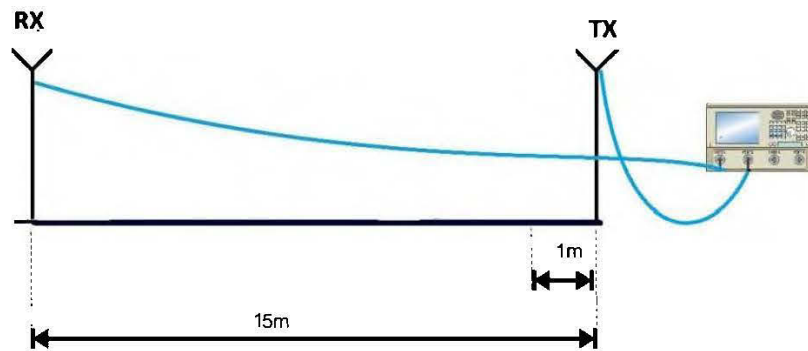


Figure 4.3 Procédure expérimentale utilisée pour les mesures.

Les tableau 1 et 2 présentent, respectivement, les paramètres, et les équipements utilisés durant les mesures à la mine souterraine.

Tableau 4.1 Paramètres de mesures

Equipements	paramètres	valeurs
VNA	La bande de fréquence	2,3GHz – 2,5GHz
	Nombre de points	2101
	Temps de balayage	Auto
	Calibration	2 ports (puissance Tx = -10 dBm)
Antennes	Type	Patch à polarisation circulaire et patch à polarisation rectiligne
	Distance TX - RX	15 m
	Hauteur de l'antenne sur le panneau	1,70m

Les figures 4.4 et 4.5 montrent, respectivement, une photo de l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) qu'on a utilisé pour les mesures et un fichier des mesures qu'on a utilisé pour caractériser le canal sous le logiciel Matlab.

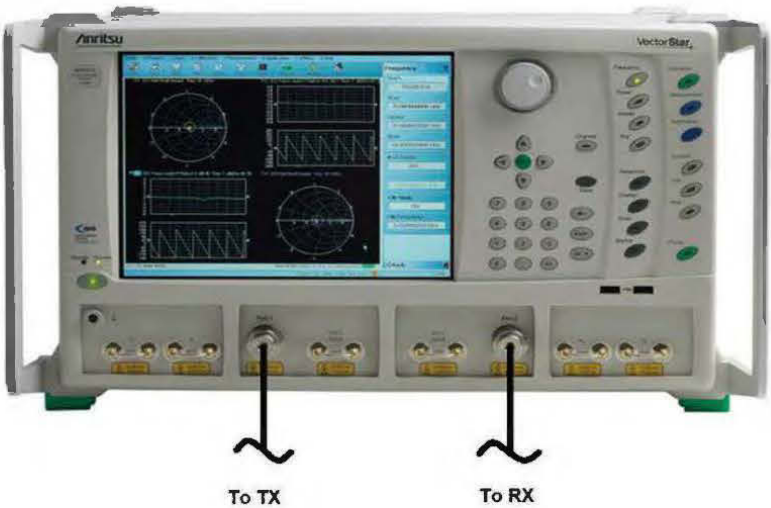


Figure 4.4 photo de l'analyseur de réseau vectoriel (VNA)

Tableau 4.2 L'équipement utilisé

Équipement	Caractéristiques
Analyseur de réseau VNA	Anritsu MS4647A, 10 MHz to 70 GHz
Câbles	StonnProduct true-blue sene -Attenuation- Nominal @ 2 GHz0.11 OdB/ft
Amplificateur de puissance	Narda West DBM-0218N625, 2 à 18 GHz
Amplificateur faible bruit	RF-Lambda RLNA01M10G, 0.1 à 18GHz
Antenne patch à polarisation circulaire	6.6 dB à 2.4GHz AR< 3dB
Antenne patch à polarisation rectiligne	6.6 dB à 2.4GHz

MS464/A										
12/22/2011, 5:54:31.PM										
CHANNEL 1										
TR MEASUREMENT										
RF CORRECTION: FULL TWO PORT CAL PORT.1,2										
AVERAGING OFF										
IF BANDWIDTH: 1KHZ										
NUMBER OF TRACES: 4										
TRACE:	TRACE.1	TRACE.2	TRACE.3	TRACE.4						
PARAMETER:	S11	S12	S21	S22						
PORT:	PORT1	PORT2	PORT1	PORT2						
GRAPH:	LOGMAG	LOGMAG, PHASE	LOGMAG, PHASE	LOGMAG						
SMOOTHING:	OFF	OFF	OFF	OFF						
TIMEDOMAIN:	OFF	OFF	OFF	OFF						
SWEEP TYPE: FREQ SWEEP (Linear)										
PNT	FREQ1.GHZ	LOGMAG1	FREQ2.GHZ	LOGMAG2	PHASE2.DEG	FREQ3.GHZ	LOGMAG3	PHASE3.DEG	FREQ4.GHZ	LOGMAG4
1	2.300000000	-2.939510E+001	2.300000000	-8.165292E+001	102.0587000	2.300000000	5.169110E+000	4.6283550	2.300000000	-2.67
2	2.300166667	-2.970796E+001	2.300166667	-7.971564E+001	129.5191000	2.300166667	5.144913E+000	3.9310030	2.300166667	-2.52
3	2.300333333	-2.953920E+001	2.300333333	-7.929267E+001	44.6626800	2.300333333	5.133686E+000	3.2086260	2.300333333	-2.37
4	2.300500000	-2.963970E+001	2.300500000	-7.513122E+001	83.8121500	2.300500000	5.105951E+000	2.5015730	2.300500000	-2.21
5	2.300666667	-2.967980E+001	2.300666667	-7.207584E+001	138.0800000	2.300666667	5.078881E+000	1.7304910	2.300666667	-2.06
6	2.300833333	-2.975356E+001	2.300833333	-8.056064E+001	60.1324400	2.300833333	5.056944E+000	0.9465294	2.300833333	-1.90
7	2.301000000	-2.981891E+001	2.301000000	-7.852202E+001	68.8192500	2.301000000	5.040575E+000	0.1167440	2.301000000	-1.75
8	2.301166667	-2.986640E+001	2.301166667	-7.524814E+001	107.5785000	2.301166667	5.005212E+000	-0.6616951	2.301166667	-1.61
9	2.301333333	-2.998474E+001	2.301333333	-7.222925E+001	85.9994100	2.301333333	4.975062E+000	-1.5077730	2.301333333	-1.48
10	2.301500000	-3.002450E+001	2.301500000	-7.842406E+001	-101.2462000	2.301500000	4.938898E+000	-2.4017960	2.301500000	-1.37
11	2.301666667	-3.019575E+001	2.301666667	-8.134518E+001	97.5120900	2.301666667	4.909172E+000	-3.1902000	2.301666667	-1.26
12	2.301833333	-3.012047E+001	2.301833333	-7.703685E+001	146.1358000	2.301833333	4.865654E+000	-4.0307620	2.301833333	-1.18
13	2.302000000	-3.039710E+001	2.302000000	-8.804711E+001	68.7746400	2.302000000	4.819098E+000	-4.8828410	2.302000000	-1.04
14	2.302166667	-3.052232E+001	2.302166667	-7.456540E+001	123.4421000	2.302166667	4.766429E+000	-5.6992430	2.302166667	-1.01
15	2.302333333	-3.047037E+001	2.302333333	-7.453519E+001	79.9510200	2.302333333	4.705077E+000	-6.5108420	2.302333333	-0.97
16	2.302500000	-3.041973E+001	2.302500000	-7.257850E+001	60.9273500	2.302500000	4.651607E+000	-7.1741760	2.302500000	-0.92
17	2.302666667	-3.070928E+001	2.302666667	-8.147360E+001	42.2729700	2.302666667	4.587066E+000	-7.9732860	2.302666667	-0.93
18	2.302833333	-3.064203E+001	2.302833333	-8.197920E+001	161.2820000	2.302833333	4.519891E+000	-8.5764520	2.302833333	-0.95
19	2.303000000	-3.075467E+001	2.303000000	-8.444754E+001	119.1688000	2.303000000	4.458535E+000	-9.2478950	2.303000000	-0.97
20	2.303166667	-3.079992E+001	2.303166667	-7.540199E+001	82.1945500	2.303166667	4.393813E+000	-9.8133840	2.303166667	-0.97
21	2.303333333	-3.077521E+001	2.303333333	-8.567728E+001	-4.9287740	2.303333333	4.328671E+000	-10.3955300	2.303333333	-1.03
22	2.303500000	-3.114908E+001	2.303500000	-7.538987E+001	99.6153600	2.303500000	4.265090E+000	-10.9539500	2.303500000	-1.09
23	2.303666667	-3.095529E+001	2.303666667	-7.268966E+001	59.4263300	2.303666667	4.212167E+000	-11.4510800	2.303666667	-1.14
24	2.303833333	-3.110332E+001	2.303833333	-7.427023E+001	99.3424800	2.303833333	4.156800E+000	-11.8053900	2.303833333	-1.20
25	2.304000000	-3.121859E+001	2.304000000	-7.838071E+001	140.0530000	2.304000000	4.102604E+000	-12.2725900	2.304000000	-1.26
26	2.304166667	-3.109318E+001	2.304166667	-7.412952E+001	24.9100600	2.304166667	4.060003E+000	-12.6653900	2.304166667	-1.32
27	2.304333333	-3.140039E+001	2.304333333	-7.853148E+001	39.6423200	2.304333333	4.017845E+000	-13.0612600	2.304333333	-1.39
28	2.304500000	-3.131193E+001	2.304500000	-7.954539E+001	68.7226800	2.304500000	3.987129E+000	-13.4280500	2.304500000	-1.44
29	2.304666667	-3.121287E+001	2.304666667	-7.334449E+001	47.1439600	2.304666667	3.959843E+000	-13.7677100	2.304666667	-1.49
30	2.304833333	-3.160359E+001	2.304833333	-8.039307E+001	18.7454000	2.304833333	3.934804E+000	-14.1986600	2.304833333	-1.53
31	2.305000000	-3.162710E+001	2.305000000	-8.278744E+001	-1.4884410	2.305000000	3.920864E+000	-14.5478500	2.305000000	-1.58
32	2.305166667	-3.144457E+001	2.305166667	-7.846983E+001	50.1459800	2.305166667	3.912641E+000	-14.9103800	2.305166667	-1.61
33	2.305333333	-3.164871E+001	2.305333333	-7.627175E+001	125.3272000	2.305333333	3.908430E+000	-15.3390100	2.305333333	-1.61
34	2.305500000	-3.149344E+001	2.305500000	-7.835183E+001	-82.8820300	2.305500000	3.904888E+000	-15.8225200	2.305500000	-1.62
35	2.305666667	-3.177952E+001	2.305666667	-8.858453E+001	-149.5260000	2.305666667	3.909796E+000	-16.3212700	2.305666667	-1.59
36	2.305833333	-3.162230E+001	2.305833333	-8.089272E+001	36.8113900	2.305833333	3.914888E+000	-16.8149500	2.305833333	-1.60
37	2.306000000	-3.177117E+001	2.306000000	-7.415786E+001	16.2421000	2.306000000	3.918577E+000	-17.4104900	2.306000000	-1.60
38	2.306166667	-3.176271E+001	2.306166667	-7.686196E+001	58.8923800	2.306166667	3.928815E+000	-17.9881200	2.306166667	-1.59
39	2.306333333	-3.172727E+001	2.306333333	-8.141754E+001	48.1936300	2.306333333	3.936176E+000	-18.6462000	2.306333333	-1.57
40	2.306500000	-3.169041E+001	2.306500000	-7.518558E+001	3.5612220	2.306500000	3.942961E+000	-19.3126200	2.306500000	-1.54
41	2.306666667	-3.185627E+001	2.306666667	-8.350630E+001	165.6031000	2.306666667	3.947605E+000	-20.1022200	2.306666667	-1.53
42	2.306833333	-3.167790E+001	2.306833333	-7.607690E+001	99.9352400	2.306833333	3.946223E+000	-20.8460500	2.306833333	-1.50
43	2.307000000	-3.168953E+001	2.307000000	-7.535896E+001	94.4942500	2.307000000	3.943938E+000	-21.6090900	2.307000000	-1.46
44	2.307166667	-3.170211E+001	2.307166667	-7.637967E+001	44.6023900	2.307166667	3.932901E+000	-22.4346000	2.307166667	-1.44
45	2.307333333	-3.165069E+001	2.307333333	-7.641165E+001	84.4633600	2.307333333	3.919806E+000	-23.2644800	2.307333333	-1.41
46	2.307500000	-3.165518E+001	2.307500000	-8.000763E+001	107.1273000	2.307500000	3.891653E+000	-24.1458800	2.307500000	-1.39
47	2.307666667	-3.166196E+001	2.307666667	-7.979676E+001	81.6468100	2.307666667	3.865507E+000	-24.9325400	2.307666667	-1.30
48	2.307833333	-3.150469E+001	2.307833333	-7.577325E+001	-22.5493200	2.307833333	3.832357E+000	-25.7486300	2.307833333	-1.31
49	2.308000000	-3.151062E+001	2.308000000	-8.467548E+001	-8.2091660	2.308000000	3.792813E+000	-26.5754000	2.308000000	-1.30
50	2.308166667	-3.150173E+001	2.308166667	-7.759579E+001	47.0668200	2.308166667	3.743263E+000	-27.3964900	2.308166667	-1.33
51	2.308333333	-3.142895E+001	2.308333333	-9.262054E+001	-51.5881400	2.308333333	3.694538E+000	-28.1003700	2.308333333	-1.34
52	2.308500000	-3.125682E+001	2.308500000	-8.372521E+001	132.8091000	2.308500000	3.640512E+000	-28.8818500	2.308500000	-1.37
53	2.308666667	-3.149838E+001	2.308666667	-7.531421E+001	59				08666667	-1.40
54	2.308833333	-3.133427E+001	2.308833333	-7.696689E+001	10				08833333	-1.45
Des informations sont requises pour la connexion à eduroam.										

Des informations sont requises pour la connexion à eduroom.

Figure 4.5 Fichier des mesures

4.3 Comparaison entre les résultats de mesure des antennes à polarisation circulaire et les antennes patch conventionnelles à polarisation rectiligne pour le système SISO

4.3.1 La réponse impulsionnelle

Le paramètre S_{21} est mesuré à l'aide d'un analyseur de réseau (VNA), qui définit la réponse fréquentielle $H(f)$ du canal. Ensuite, la réponse impulsionnelle est obtenue par la transformée de Fourier inverse de la réponse fréquentielle mesurée ($H(f) = S_{21}$).

Les figures 4.6 et 4.7 montrent, respectivement pour le scénario en visibilité directe (LOS), les réponses impulsionnelles sur trois distances de l'antenne patch à polarisation circulaire et pour l'antenne patch à polarisation rectiligne. Ces figures représentent aussi la distance de séparation entre l'émetteur et le récepteur en fonction du temps d'arrivée. À partir des premiers trajets, nous avons calculé la distance en ligne de vue directe par la formule : ($d = \text{temps d'arrivée} \times \text{la vitesse de propagation du signal}$). Cette distance calculée doit correspondre à la distance utilisée durant les mesures. Après vérification, nous avons obtenu des valeurs très proches. On remarque aussi, que pour les trois distances, la puissance reçue en fonction du temps d'arrivée dans le canal minier est plus grande quand on utilise des antennes à polarisation circulaire. Ceci est dû à la polarisation parce que les deux types d'antenne ont les mêmes caractéristiques.

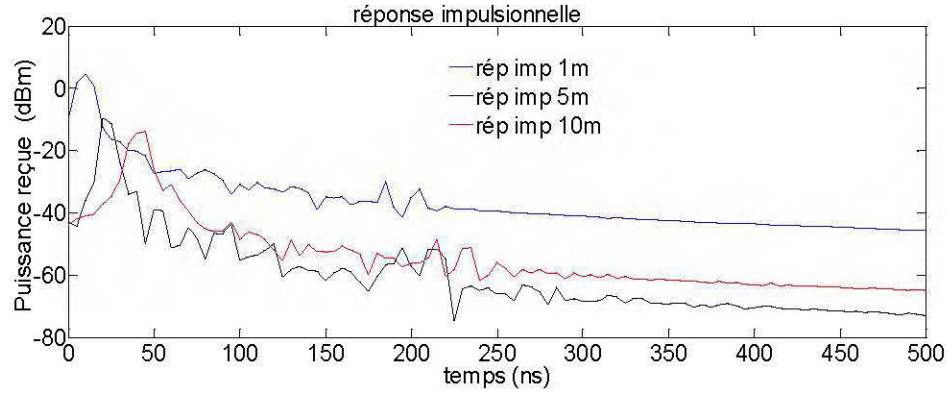


Figure 4.6 La réponse impulsionnelle du canal (cas des antennes patch à polarisation circulaire)

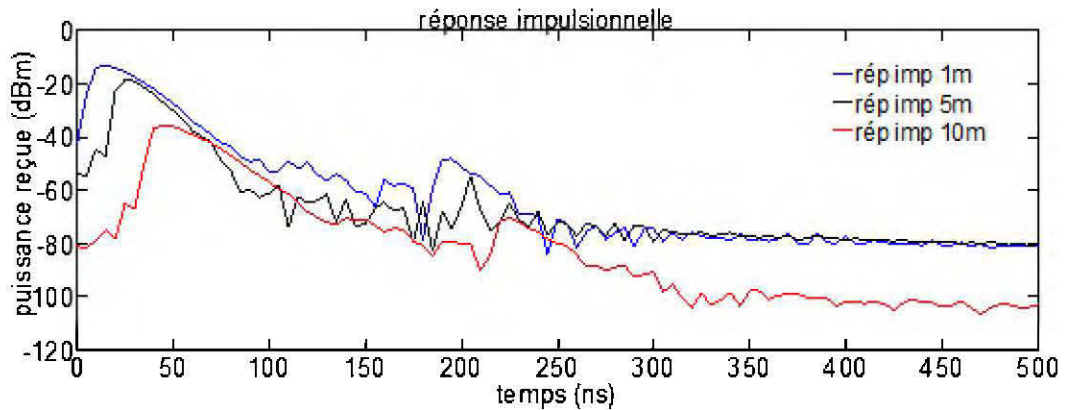


Figure 4.7 La réponse impulsionnelle du canal (cas des antennes patch à polarisation rectiligne)

4.3.2 L'affaiblissement de parcours (Path loss)

L'affaiblissement de parcours est défini comme étant le rapport de la puissance transmise à la moyenne locale de la puissance reçue (eq. 2.19). La méthode de régression linéaire a été utilisée pour déterminer l'exposant de l'évanouissement de parcours. La figure 4.8 montre l'affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système SISO- patch à polarisation circulaire. Les résultats montrent que l'évanouissement de parcours augmente avec la distance à l'exception de quelques

distances (8m, 10 m, 11m, et 13m) cela dû au phénomène de multi trajet. Dans ce cas, l'exposant de l'évanouissement de parcours est égal à 1,74.

La figure 4.9 illustre l'affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système SISO-patch à polarisation rectiligne. Les résultats montrent que l'affaiblissement de parcours augmente avec la distance à l'exception des distances (4 m, 9 m et 10 m) ou il y a le phénomène de multi trajet. L'exposant de l'évanouissement de parcours dans ce cas égal à 2,8 ; il est un peu supérieur à celui de l'espace libre c'est à cause des interférences et à la difficulté d'aligner les antennes pendant les mesures.

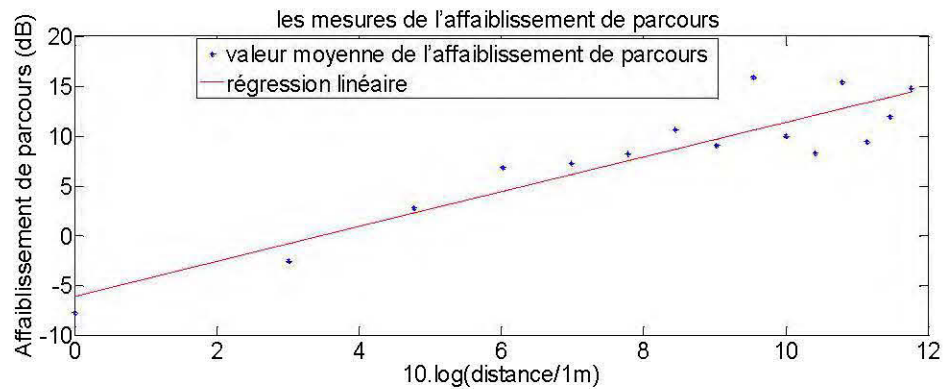


Figure 4.8 Évanouissement de parcours et la régression linéaire pour le système SISO- patch à polarisation circulaire

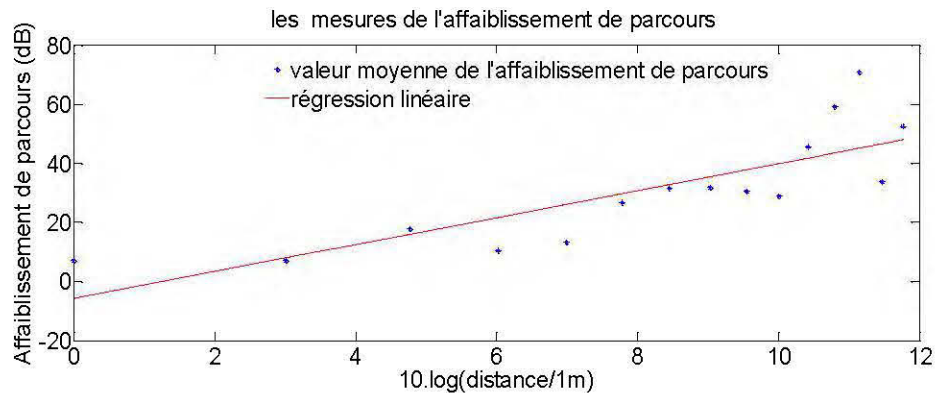


Figure 4.9 Évanouissement de parcours et la régression linéaire pour le système SISO- patch à polarisation rectiligne

En comparant les deux antennes patchs à polarisation circulaire et à polarisation rectiligne, on remarque que l'exposant de l'évanouissement de parcours du premier type est plus faible de celui du deuxième type. Cela signifie que la puissance du signal est plus grande pour les antennes à polarisation circulaire.

4.3.3 La bande de cohérence et l'étalement des retards (RMS delay spread)

L'étalement des retards (RMS delay spread) a été déterminé en utilisant l'équation (2.13) décrite dans le chapitre 2. De même, la bande de cohérence du canal de propagation est déterminée en utilisant les équations (2.16) et (2.17). Les résultats sont différents par rapport aux résultats dans d'autres environnements (indoor et outdoor). Cependant, les résultats dans les figures 4.10 et 4.11 sont spécifique pour le milieu minier souterrain à cause des parois non uniforme de la galerie. On remarque que l'étalement des retards du SISO-Patch circulaire est supérieur à celui de SISO-Patch rectiligne, et aussi SISO-Patch circulaire est capable de recevoir plus de multi-trajet que SISO-Patch rectiligne,

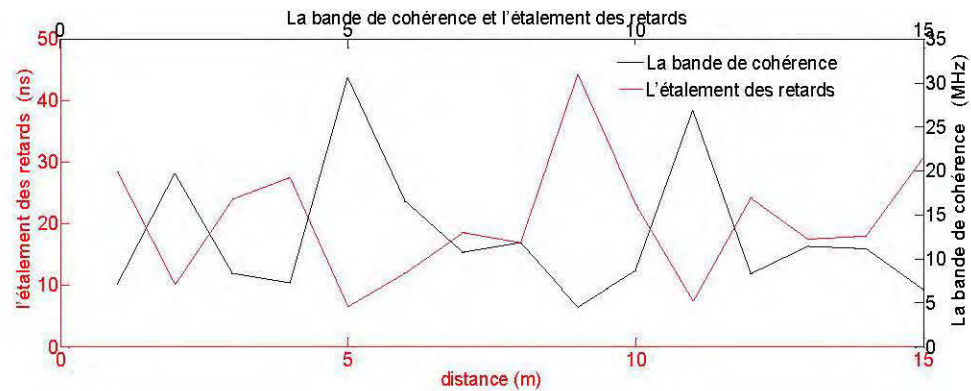


Figure 4.10 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour SISO- patch à polarisation circulaire

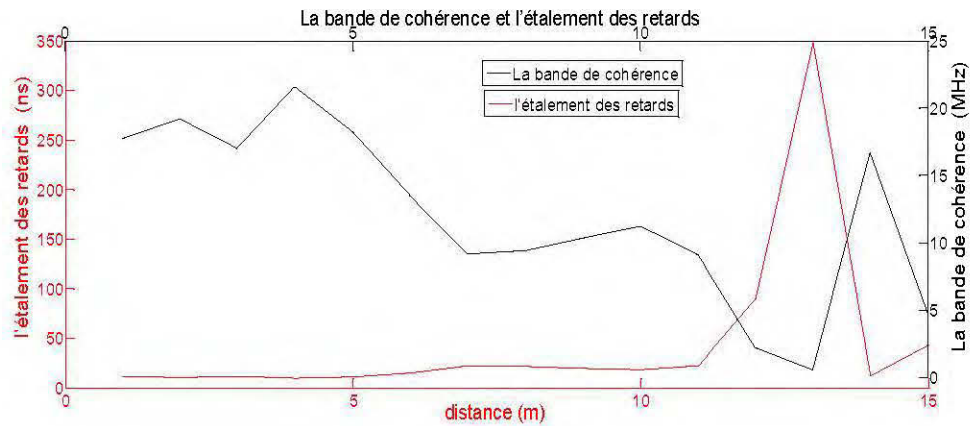


Figure 4.11 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour SISO- patch à polarisation rectiligne

4.3.4 La capacité du canal

La capacité du canal SISO (tracées sur les figures 4.12 et 4.13) est déduite des mesures en utilisant la formule de Shannon (2.8). Les figures 4.12 et 4.13 présentent, respectivement, la capacité pour l'antenne patch circulaire et la capacité pour l'antenne patch rectiligne pour le scénario en ligne de vue direct (LOS). On voit clairement que les résultats de la capacité de canal sont corrélés aux résultats de l'affaiblissement de parcours, ou la capacité augmente aux mêmes distances où l'affaiblissement de parcours diminue. La capacité du canal pour l'antenne SISO-patch circulaire est supérieure à celle obtenue par l'antenne SISO-patch rectiligne

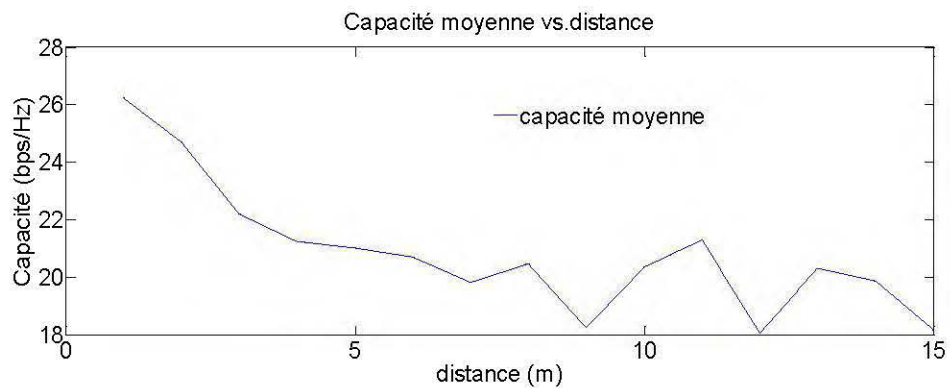


Figure 4.12 Capacité SISO-patch circulaire (LOS) en fonction de la distance

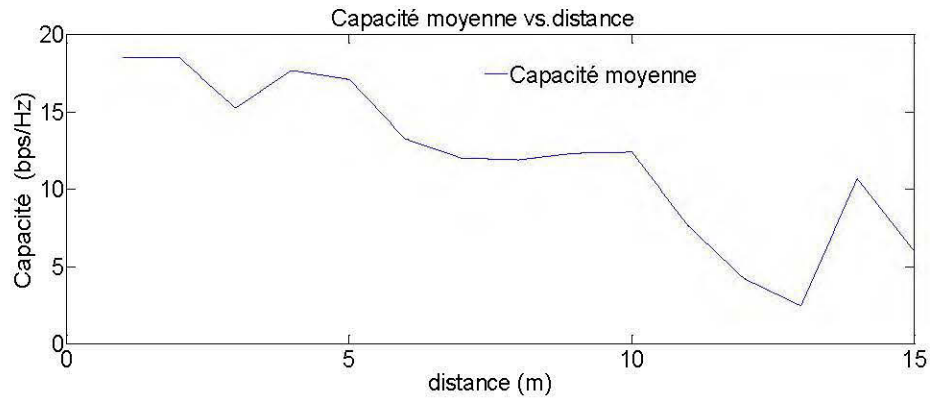


Figure 4.13 Capacité SISO-patch rectiligne (LOS) en fonction de la distance

4.4 Comparaison entre les résultats de mesure des antennes à polarisation circulaire et les antennes patch conventionnelles à polarisation rectiligne pour le système MIMO 2X2

4.4.1 La réponse impulsionnelle

La réponse impulsionnelle du canal MIMO est représentée comme une moyenne des réponses impulsionnelles de tous les sous-canaux. Le signal, dans le cas du scénario en visibilité directe (LOS), porte la plus grande puissance parmi les signaux reçus par les multiples trajets.

Les figures 4.14 et 4.15 présentent, respectivement, les réponses impulsionnelles des antennes à polarisation circulaire et des antennes à polarisation rectiligne pour trois distances 1m, 5m et 10m. Le signal en ligne de vue direct (LOS) possède la plus grande puissance parmi les signaux reçus par trajets multiples. Ce signal est plus fort quand l'émetteur est proche du récepteur (la distance de 1m), et diminue progressivement avec l'augmentation de la distance d_{TX-RX} . On peut noter qu'il est clair que la puissance de signal en utilisant des antennes à polarisation circulaire est meilleure que celle en utilisant des antennes à polarisation rectiligne parce que le signal reçu, par les antennes à polarisation circulaire pour les trois distances (1m, 5m et 10m), est plus grand que le signal reçu en utilisant des antennes rectilignes.



Figure 4.14 Réponse impulsionnelle (pour le cas de l'antenne patch à polarisation circulaire)



Figure 4.15 Réponse impulsionnelle pour le cas de l'antenne patch à polarisation rectiligne

4.4.2 L'affaiblissement de parcours (Path loss)

L'affaiblissement de parcours a été déterminé par la formule (2.19). La méthode de régression linéaire a été adoptée pour déterminer l'exposant de perte de trajectoire dans (2.19). Les résultats montrent que l'évanouissement de parcours dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Les figures 4.16 et 4.17 montrent les résultats de l'affaiblissement de parcours pour MIMO-Patch circulaire et MIMO-Patch rectiligne. En comparant les deux résultats des deux types d'antenne, on remarque que l'exposant de l'affaiblissement lors de l'utilisation des antennes MIMO patch à polarisation circulaire est inférieur à celui

lorsqu'on utilise des antennes MIMO patch à polarisation rectiligne (tableau 3). Ceci explique que la polarisation joue un rôle très important pour la propagation d'un canal de transmission radio dans un milieu confiné.

Tableau 4.3 l'exposant de l'affaiblissement pour les deux types d'antenne

Type d'antenne	Antenne patch à polarisation circulaire	Antenne patch à polarisation rectiligne
SISO	1,74	2,8
MIMO	1,35	1.64

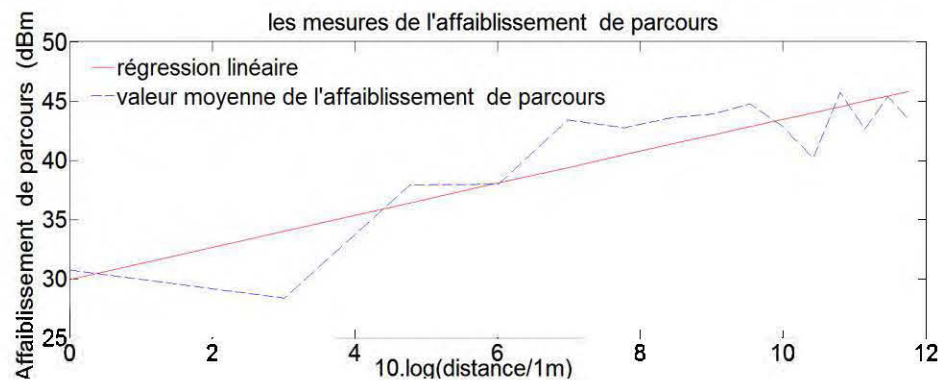


Figure 4.16 Affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système MIMO- patch à polarisation circulaire

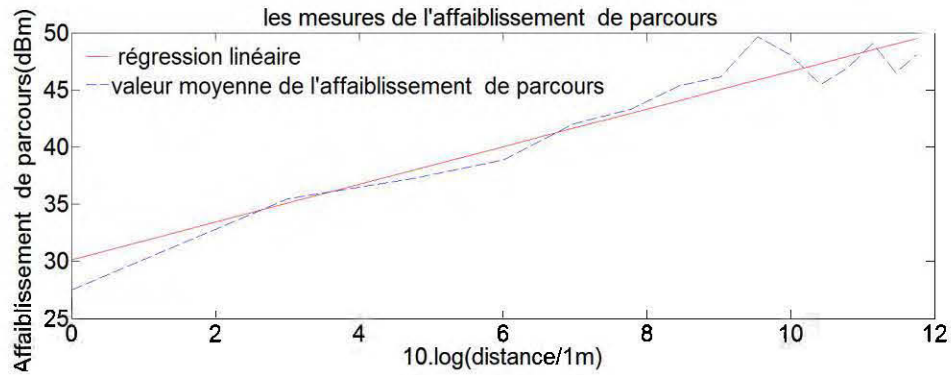


Figure 4.17 Affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système MIMO- patch à polarisation rectiligne

4.4.3 La bande de cohérence et l'étalement des retards (RMS delay spread)

Les figures 4.18 et 4.19 présente, respectivement, la bande de cohérence et l'étalement des retards pour le système MIMO- patch à polarisation circulaire ainsi que pour MIMO- patch à polarisation rectiligne en fonction de la distance $d_{T_X-R_X}$ pour la visibilité directe (LOS). On remarque que les résultats sont différents par rapport aux résultats que nous pouvons trouver dans d'autres environnements. Ceci est probablement dû à la réflexion sur le mur de la galerie qui n'est pas uniforme. La courbe de l'étalement des retards (RMS delay spread), pour MIMO-Patch circulaire, est variable à différentes distances. Cela est dû à la configuration de la géométrie aléatoire de la galerie minière (sol n'est pas plat et les mures non uniforme) et la bande de cohérence qui est aléatoire et très variable avec les positions du récepteur.

Les résultats pour le MIMO-Patch rectiligne montrent les valeurs de l'étalement des retards (RMS delay spread) qui sont entre 10ns et 34 ns. Les résultats montrent des comportements de propagation spécifiques à des environnements miniers souterrains. Cependant l'étalement des retards pour MIMO-Patch circulaire est plus élevé que l'étalement des retards pour le MIMO-Patch rectiligne dans la plupart des distances parce que l'antenne circulaire reçoit plus de multi trajet que l'antenne rectiligne.

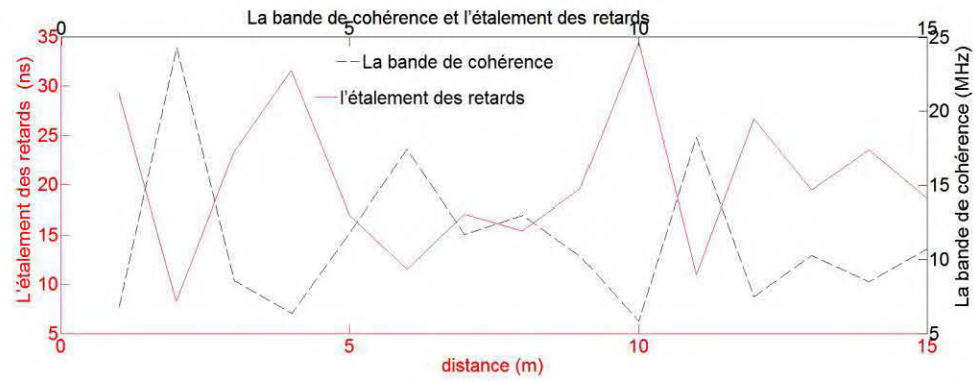


Figure 4.18 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour MIMO- patch à polarisation circulaire.

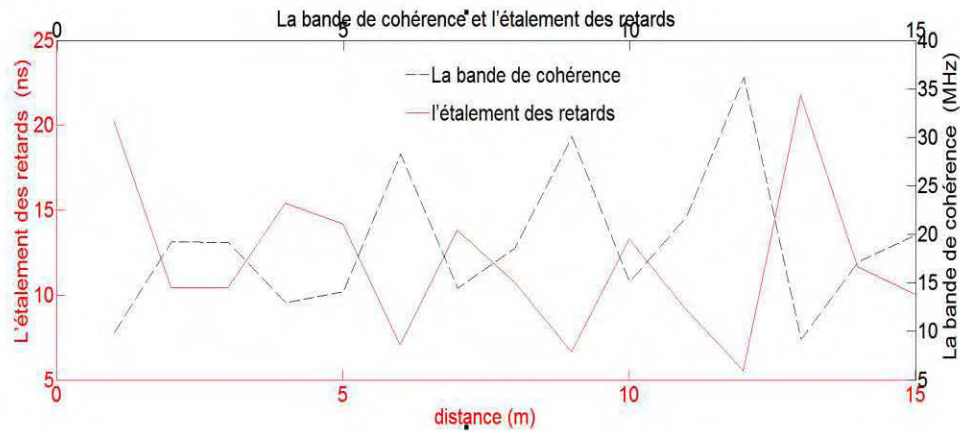


Figure 4.19 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour MIMO- patch à polarisation rectiligne

4.4.4 La capacité du canal

La capacité du canal MIMO, (figure.4.20 et 4.22), pour les antennes patch à polarisation circulaire et patch à polarisation rectiligne respectivement, est déduite des mesures en utilisant la formule (2.9). Il est à noter que la capacité moyenne et la capacité à un certain niveau de probabilité décroît avec la distance (figures 4.21 et 4.23). Ceci s'explique par le fait que les plus petites distances correspondent à une puissance moyenne plus élevée, donc un SNR moyen reçu plus élevé. On remarque les mêmes résultats pour le patch à polarisation rectiligne. En outre, on conclut que, pour MIMO-Patch à polarisation circulaire pour une distance d_{TX-RX} de 1m à 15m, la

capacité du canal varie respectivement entre $C_{max} \approx 47 \text{ bps/Hz}$ à $C_{min} \approx 34 \text{ bps/Hz}$ et de $C_{max} \approx 46 \text{ bps/Hz}$ à $C_{min} \approx 32 \text{ bps/Hz}$ pour MIMO-Patch à polarisation rectiligne. Malgré les résultats sont proche dus aux mêmes caractéristiques des antennes, à l'exception de la polarisation qui est différente, il est à noter que l'utilisation des antennes patch à polarisation circulaire offre une amélioration au niveau de la capacité par rapport à l'utilisation des antennes patch à polarisation rectiligne.

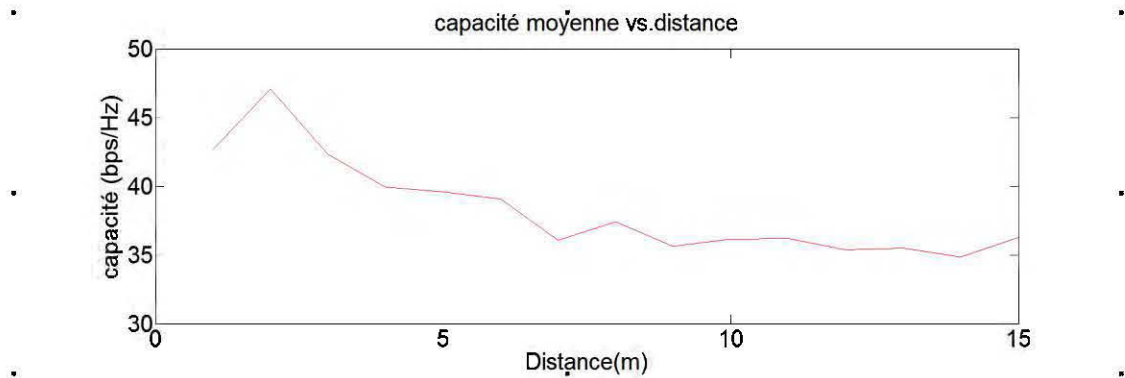


Figure 4.20 Capacité MIMO-patch circulaire (LOS) en fonction de la distance

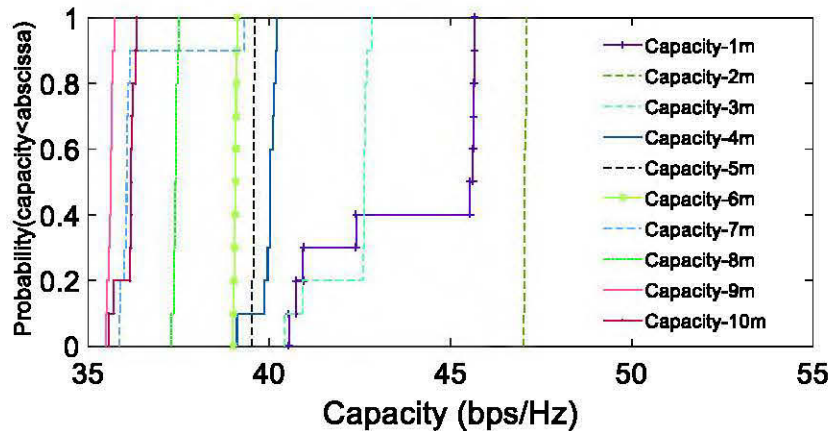


Figure 4.21 CDF de la capacité MIMO-Patch circulaire (LOS) pour les quinze distances

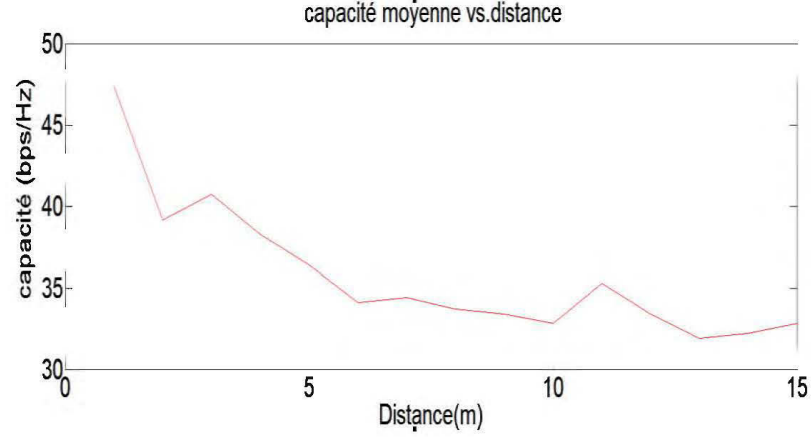


Figure 4.22 Capacité MIMO-patch rectiligne (LOS) en fonction de la distance

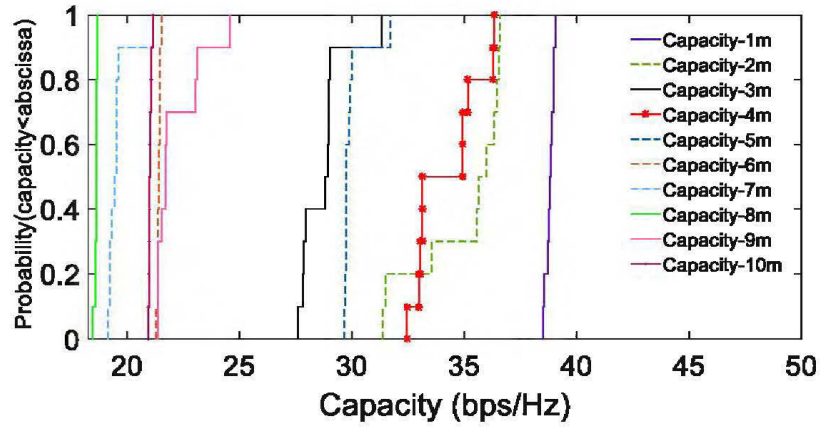


Figure 4.23 CDF de la capacité MIMO-Patch rectiligne (LOS) pour les quinze distances

4.4.5 Facteur de Rice

Le facteur de Rice est une mesure importante pour évaluer la qualité du signal de transmission, la capacité et les performances de la technique MIMO dépendent de ce paramètre. Dans ce travail, le facteur de Rice est mesuré pour chaque distance entre l'émetteur et le récepteur pour la visibilité direct (LOS). Le facteur de Rice est estimé d'après [4] comme suit :

$$K(\text{dB}) = \frac{\varepsilon[|H|]^2}{2\text{var}[|H|]} \quad (4.1)$$

Les courbes, dans les figures (4.24 et 4.25), présentent le facteur K en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. On a fait l'extraction du facteur K de chaque mesure pour les deux types d'antenne. En observant les résultats, nous pouvons conclure que le facteur Rice dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Ce facteur diminue en général lorsqu'on augmente la distance $d_{T_X-R_X}$ à l'exception de quelques distances et ça revient toujours à la structure de la galerie minière qui n'est pas uniforme.

Les résultats montrent que le facteur de Rice est plus important pour le système MIMO patch à polarisation rectiligne que celui pour MIMO patch à polarisation circulaire. Cela est dû à l'antenne circulaire qui reçoit un composant LOS d'une puissance considérablement plus importante.

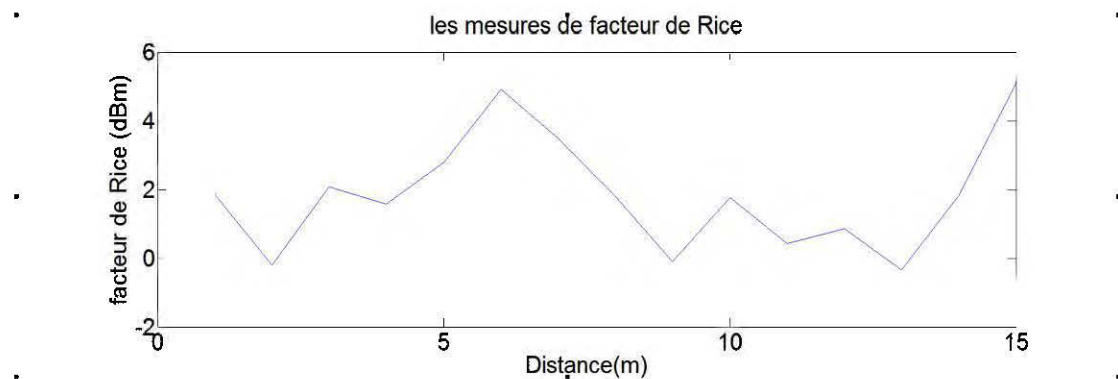


Figure 4.24 Facteur de Rice pour MIMO patch à polarisation circulaire

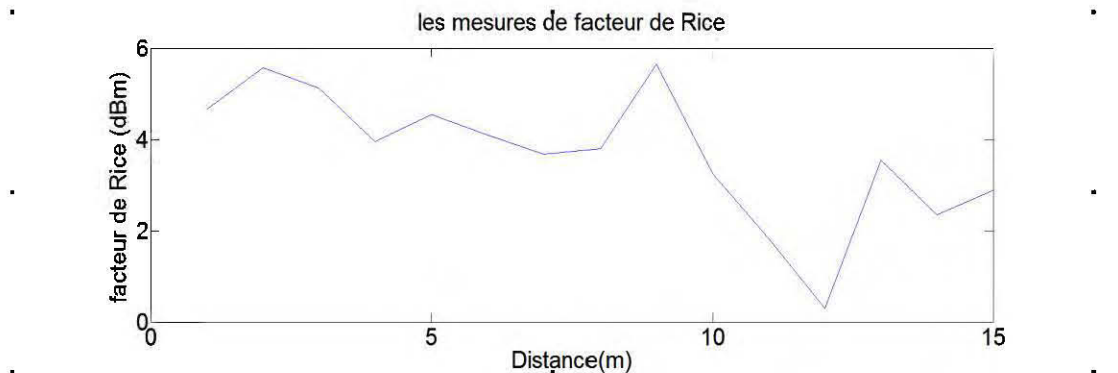


Figure 4.25 Facteur de Rice pour MIMO patch à polarisation rectiligne

4.5 Comparaison entre les résultats de mesure des antennes à polarisation circulaire et les antennes patch conventionnelles à polarisation rectiligne pour le système MIMO 2X2 pour un alignement de 90 degrés (dépolarisation de 90 degrés).

4.5.1 La réponse impulsionnelle

Les figures 4.26 et 4.27 présentent, respectivement, les réponses impulsionnelles des antennes à polarisation circulaire et des antennes à polarisation rectiligne pour trois distances 1m, 5m et 10m (défaut de polarisation de 90 degrés). La puissance reçue est grande quand l'émetteur est proche du récepteur (la distance de 1m), et diminue progressivement avec l'augmentation de la distance $d_{T_X-R_X}$. La raison pour laquelle on a un signal reçu en utilisant MIMO Patch rectiligne avec une dépolarisation de 90 degrés est dû au fait que ce dernier reçoit des signaux réfléchis sur les surfaces rugueuses de la mine ce qui les rend détectables au récepteur.

En effet, même avec la dépolarisation de 90 degrés des antennes, on remarque que le signal issu des antennes à polarisation circulaire est meilleur que le signal issu des antennes à polarisation rectiligne.

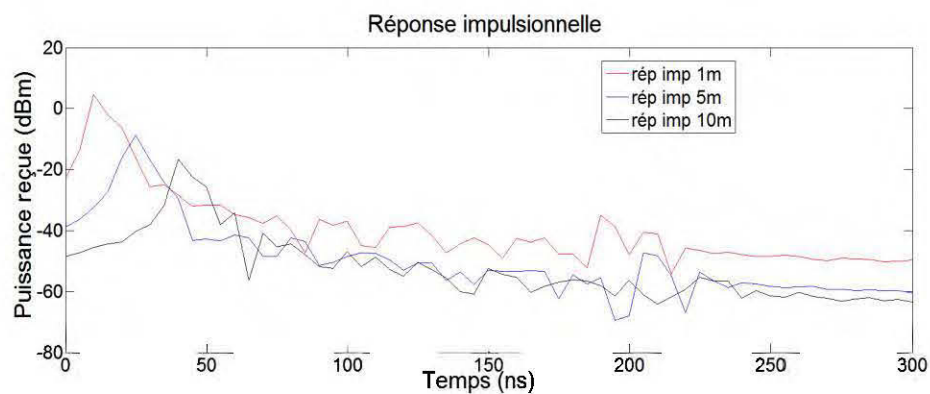


Figure 4.26 Réponse impulsionnelle pour le cas de l'antenne patch à polarisation circulaire.

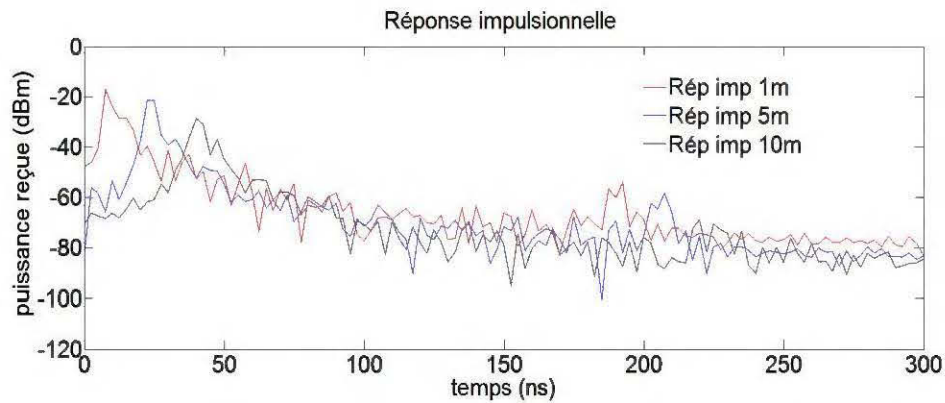


Figure 4.27 Réponse impulsionnelle pour le cas de l'antenne patch à polarisation rectiligne.

4.5.2 L'affaiblissement de parcours (Path loss)

Les figures 4.28 et 4.29 montrent les résultats de l'affaiblissement de parcours pour MIMO-Patch circulaire et MIMO-Patch rectiligne. En comparant les deux résultats des deux types d'antenne avec une dépolarisation de 90 degrés, on remarque que l'exposant de l'affaiblissement lors de l'utilisation des antennes MIMO patch à polarisation circulaire $PL = 1,35$ est inférieur à celui lorsqu'on utilise des antennes MIMO patch à polarisation rectiligne $PL = 3,08$. Aussi, la dépolarisation de l'antenne patch à polarisation rectiligne augmente l'exposant de l'affaiblissement, par contre la dépolarisation de l'antenne patch à polarisation circulaire reste stable.

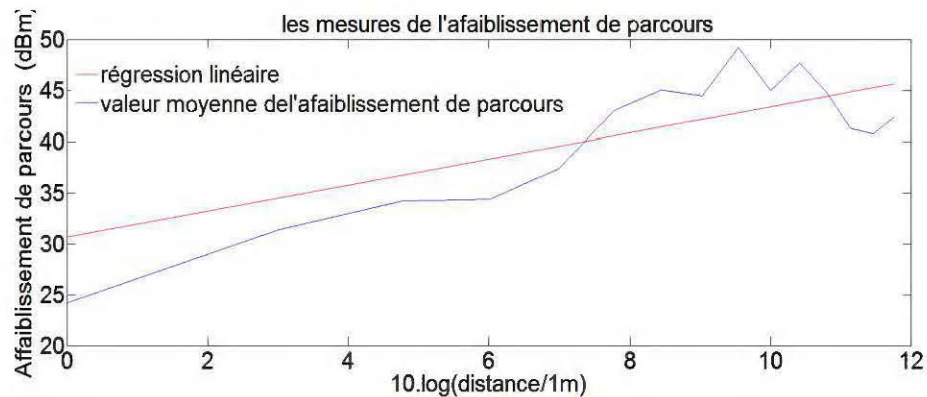


Figure 4.28 Affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système MIMO- patch a polarisation circulaire.

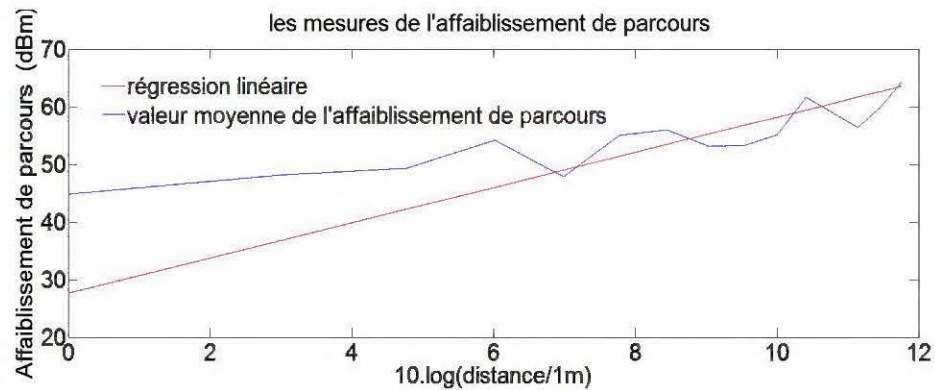


Figure 4.29 Affaiblissement de parcours et la régression linéaire pour le système MIMO- patch à polarisation rectiligne.

4.5.3 La capacité du canal

La capacité du canal MIMO, pour les antennes patch à polarisation circulaire et patch à polarisation rectiligne, respectivement, avec un alignement des antennes de 90 degrés est illustré dans les figures 4.30 et 4.31. On remarque que la capacité du signal en utilisant des antennes à polarisation circulaire est plus grande que celle utilisant des antennes à polarisation rectiligne. On constate que la dépolarisation des antennes à polarisation circulaire n'a pas affecté le signal reçu, contrairement à l'antenne à polarisation rectiligne.

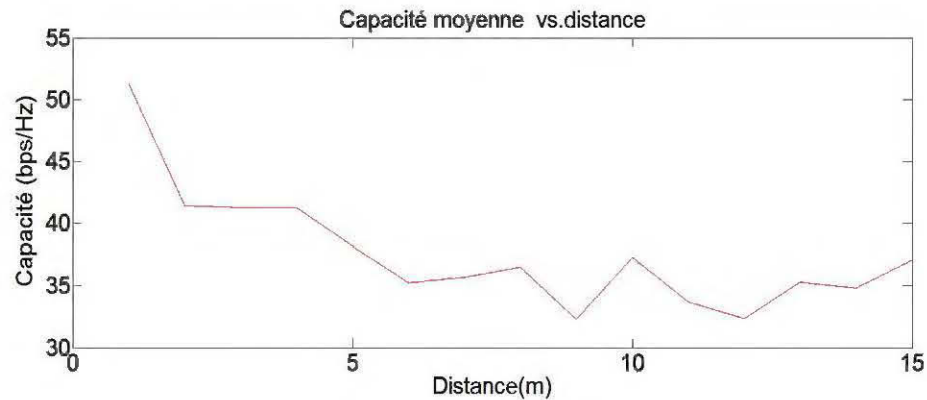


Figure 4.30 Capacité MIMO-patch circulaire (LOS) en fonction de la distance.

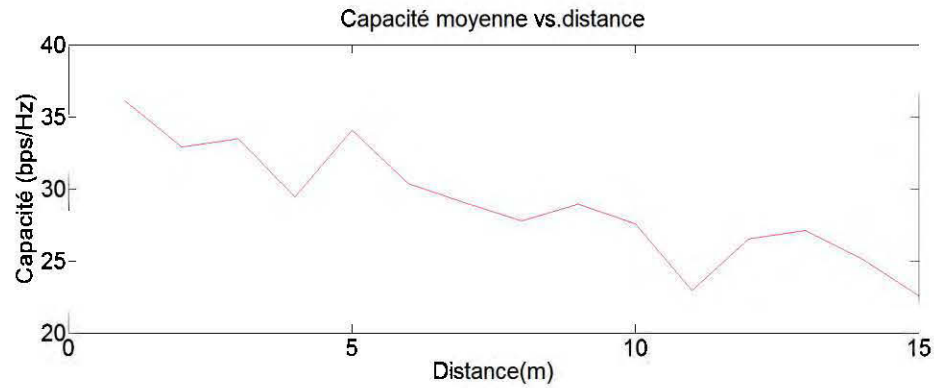


Figure 4.31 Capacité MIMO-patch rectiligne (LOS) en fonction de la distance.

4.5.4 La bande de cohérence et l'étalement des retards (RMS delay spread)

Les figures 4.32 et 4.33 montrent, respectivement, la bande de cohérence et l'étalement des retards pour le système MIMO- patch à polarisation circulaire, ainsi que pour le MIMO- patch à polarisation rectiligne en fonction de la distance d_{TX-RX} pour la visibilité directe (LOS) avec une dépolarisation de 90 degrés. Le résultat de l'étalement des retards (RMS delay spread) est variable à différentes distances. Cela est dû à la géométrie spécifique de la mine. De même, avec cette dépolarisation des antennes, on remarque que l'étalement des retards pour le cas des antenne patch à polarisation circulaire est plus élevé que ce pour le MIMO-Patch rectiligne.

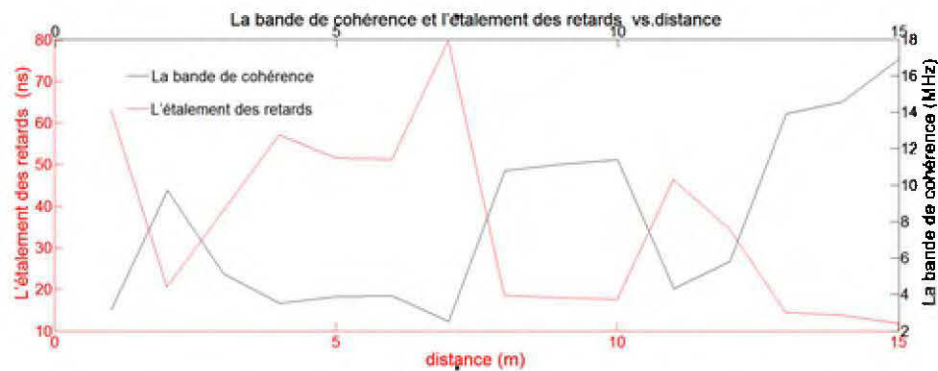


Figure 4.32 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour MIMO- patch à polarisation circulaire.

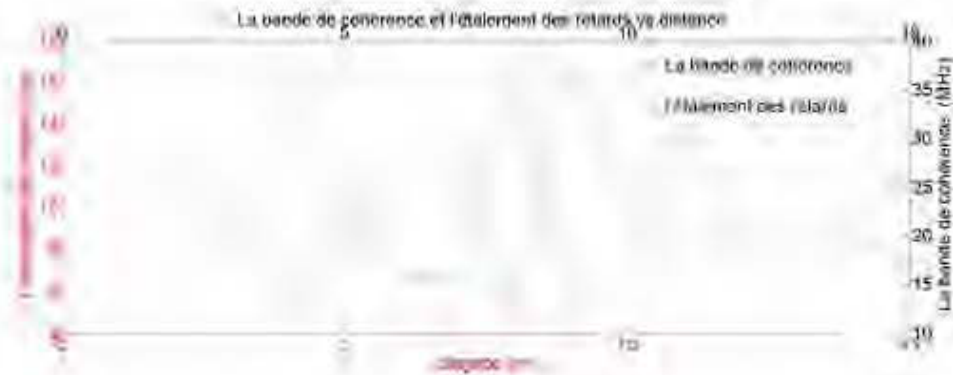


Figure 4.33 La bande de cohérence et l'étalement des retards pour MIMO- patch à polarisation rectiligne

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les performances du système MIMO patch à polarisation circulaire ont été étudiées, évaluées à 2.4 GHz et comparées au système MIMO patch à polarisation rectiligne. L'étude, basée sur des mesures, est effectuée dans une mine souterraine à la bande de fréquence 2,4 GHz pour montrer que la structure de l'environnement affecte considérablement les performances du système. Les résultats ont été présentés pour le système LOS qui a une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. D'après l'étude comparative, on a remarqué que les antennes à polarisation circulaire ont offert de meilleurs résultats et une amélioration remarquable en termes de la capacité et la puissance du signal que ceux obtenus par les antennes à polarisation rectiligne.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La caractérisation du canal minier souterrain, en utilisant des antennes patch à polarisation circulaire et des antennes patch à polarisation rectiligne, a fait l'objet du travail présenté dans ce mémoire. Les deux types d'antennes ont été conçues pour fonctionner à la fréquence de 2,4 GHz. Afin d'étudier l'effet de la polarisation de l'antenne sur les performances du canal, des mesures ont été effectuées dans un environnement minier souterrain au niveau 90 m. Une analyse a été effectuée à grande échelle pour les deux technologies SISO et 2x2 MIMO en ligne de vue direct (LOS). Les fonctions de transfert du canal de propagation ont été mesurées dans la galerie minière avec deux différents types d'antennes, avant d'être transformées en réponses impulsionnelles.

La capacité du canal dépend essentiellement des caractéristiques par trajets multiples, et des propriétés d'antenne telle que la polarisation et les pertes dues à l'affaiblissement de parcours. La technologie MIMO offre une meilleure capacité par rapport aux systèmes SISO malgré la présence de la corrélation des sous canaux. Il a été démontré que l'antenne patch à polarisation circulaire offre de meilleures performances que celles de l'antenne patch à polarisation rectiligne en termes de la capacité et l'affaiblissement de parcours.

L'affaiblissement de parcours en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur pour les deux types d'antennes a montré que l'exposant de l'évanouissement de parcours est proche de l'exposant dans l'espace libre. Il a été conclu, aussi, que le système MIMO-Patch à polarisation circulaire, offre une meilleure couverture du signal par rapport à l'antenne MIMO-Patch à polarisation rectiligne.

D'autre part, les analyses des résultats de l'étalement des retards (RMS delay spread) ont montrés que l'utilisation des antennes à polarisation circulaire réduit les délais de multi- trajets causé par les phénomènes de réflexion pendant la transmission du signal.

La conclusion générale, qui peut être tirée de ce travail, est que la caractérisation d'un canal dans un environnement minier utilisant des antennes patch à polarisation

circulaire offre des meilleures performances malgré la présence des défauts de polarisation.

Les résultats de notre étude offrent une aide pour les chercheurs et ingénieurs dans le domaine de la caractérisation du canal de propagation dans un milieu minier souterrain. D'autres améliorations peuvent être ajoutées tels que l'étude à la visibilité indirecte (NLOS) entre l'émetteur et le récepteur. Il serait intéressant aussi de faire l'étude en utilisant d'autre type d'antenne mais toujours à polarisation circulaire.

RÉFÉRENCES

- [1] M. El Azhari, "Caractérisation du canal de propagation Ban dans un milieu minier", Master thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Janvier 2015.
- [2] Eric ARNAUD, "Contribution à la conception d'antennes B.I.E métalliques à polarisation circulaire alimentées par cornet.". Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Limoges, 2010.
- [3] Bilel Mnasri, " Caractérisation d'un canal de propagation souterrain en utilisant la technologie MIMO et le traitement dans le domaine angulaire", Master thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [4] Azzeddine Salim, " Modulation adaptative pour les systèmes MIMO dans un environnement minier souterrain", Master thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [5] Jean François Pardonche, " Système de transmission sans fil multi- émetteurs, multi-récepteurs pour des applications transports. Étude des modèles de canal de propagation «, Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur, l'université des sciences et technologies de Lille, Février 2004.
- [6] Pascal Djiknavorian, " MIMO pour les nuls", Laboratoire de Radio télécommunications et de Traitement du Signal université Laval, Janvier 2006.
- [7] Gérald Moniak, " Techniques MIMO pour un lien sans fil robuste entre un bus et un poste de contrôle pour une application de surveillance embarquée", Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de L'Université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Février 2007.

- [8] Hamid Chorfi, " Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique ", Master thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Mai 2012.
- [9] Ameziane Djamel, " Etude et Optimisation d'Antennes Fractales Plaquées", Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algerie, Mai 2009.
- [10] Alexandre Boyer, Antennes, Support de cours énoncé de travaux dirigés, Institut national des appliquées de Toulouse.
- [11] Ben Mabrouk, I.; Talbi, L.; Nedil, M. "Performance Evaluation of a MIMO System in Underground Mine Gallery", Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, On page(s): 830 - 833 Volume: 11, 2012
- [12] Ben Mabrouk, I.; Talbi, L.; Nedil, M.; Hettak, K. "MIMO-UWB Channel Characterization Within an Underground Mine Gallery», Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, On page(s): 4866 - 4874 Volume: 60, Issue: 10, Oct. 2012.
- [13] A. F. Molisch, M. Z. Win, and J. H. Winters, "Capacity of MIMO systems with antenna selection," in IEEE International Conference on Communications, (Helsinki), pp. 570–574, 2001.
- [14] M. Lienard and P. Degauque, "Propagation in wide tunnels at 2 GHz: A statistical analysis," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 47, no. 1, pp. 283–296, Feb. 1998.
- [15] Inanoglu, Hakan, "Multiple-Input Multiple-Output System Capacity: Antenna and Propagation Aspects," Antennas and Propagation Magazine, IEEE, vol.55, no.1, pp.253,273, Feb. 2013.
- [16] G. Srivastava, S. Dwari, and B. K. Kanuijia, "A compact 4×4 ultrawideband(UWB) band notched MIMO antenna," in 2014 IEEE International Microwave and RF Conference, IMaRC 2014, 2015, pp. 198-200.

- [17] I. Ben Mabrouk, L. Talbi, B. Mnasri, M. Nedil, and N. Kandil «Experimental characterization of a wireless MIMO channel at 2.4 GHz in underground mine gallery,» Progress In Electromagnetics Research Letters, vol. 29, pp. 97-106,, 2012.
- [18] I. Ben Mabrouk, L. Talbi, M. Nedil, Y. Coulibaly and T. A. Denidni, “MIMO Channel Characterization at 2.4 GHz in Underground Gold Mines,” 2011 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation. Spokane, USA.
- [19] El-Azhari, M. E., M. Nedil, I. Benmabrouk, and L. Talbi, “Off-body channel characterization at 2.45 GHz in underground mine environment,” Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int.Symp. (APSURSI), 251–252, Jul. 6–11, 2014.
- [20] B. Mabrouk L. TalbiM. NedilY. CoulibalyT.A. Denidni «Effect of antenna directivity on performance of multipleinput multiple output systems in an underground gold mine,»,»IET Microw.Antennas Propag., vol. 6, p. 555–556, 12 April 2012.
- [21] W. Q. Malik, “MIMO capacity convergence in frequency-selective channels,” IEEE Trans. Commun., vol. 57, no. 2, pp. 353–356, Feb.2009.
- [22] El-Azhari, M. E., M. Nedil, I. Benmabrouk, L. Talbi, and K. Ghanem, “Off-body LOS and NLOS channel characterization in a mine environment,” International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), Marrakesh, Morocco, 2015.
- [23] B. Mabrouk. B. Mnasri, «"Experimental characterization of wireless MIMO channel at 5.8 GHz in underground gold mine,"» Progress In Electromagnetics Research C, vol. 36, pp. 169-180, 2013.
- [24] M.E. El-Azhari, M. Nedil, I. Benmabrouk, and L. Talbi, “Off-Body Performance of Patch Antenna in Underground Mine,” presented at the Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp. (APSURSI), Jul. 18–25, 2015.

- [25] I. a. P. S. H. Khan, «"Experimental evaluation of MIMO capacity and correlation for narrowband body-centric wireless channels,"», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, pp. 195-202, January 2010.
- [26] M. El Azhari, M. Nedil, I. B. Mabrouk, K. Ghanem, and L. Talbi, "Characterization of an off-body channel at 2.45 GHz in an underground mine environment," Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 43, 91-100, 2015
- [27] A Alomainy, "Antennas and Radio Propagation for Body-centric Wireless Networ», PhD Thesis, Queens Mary Uni, London, May 2007.
- [28] Alaa CHOUMANE, " Synthèse d'un canal de propagation par système multiantennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité ", Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Limoges, Juin 2011.
- [29] Hamou Chehri, " Étude et caractérisation d'un canal de propagation pour les réseaux vanet ", Master thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Juin,2014.
- [30] J.M. FLEURIAULT, « Synthèse du diagramme de rayonnement d'un réseau de sources », thèse de doctorat, université de RENNES I, 1996
- [31] A. F. Molisch, M. Z. Win, and J. H. Winters, "Capacity of MIMO systems with antenna selection," in IEEE International Conference on Communications, (Helsinki), pp. 570–574,
- [32] J.-M. Molina-Garcia-Pardo, M. Liénard, P. Degauque, D. Dudley, and L. Juan Llácer, "Interpretation of MIMO channel characteristics in rectangular tunnels from modal theory,"IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 57, no. 3, pp. 1974–1979, May 2008.2001.

- [33] I. E. Telatar, «Capacity of multi-antenna Gaussian channels, » European Trans. Telecommun. (ETT), vol. vol. 10, p. 585–595, Nov./Dec. 1999.
- [34] Youssef Rissafi, " Caractérisation d'un canal minier souterrain Ultra- large bande (3GHz-10GHZ)", Master thesis, Université en Outaouais, Juin 2007.
- [35] Zied Harouni, " Conception et caractérisation d'une Rectenna à double polarisation Circulaire à 2.45 GHz", Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur, de l'Université Paris-Est et de la Faculté des Sciences de Tunis, Novembre 2011.
- [36] Nicolas FORTINO, " Conception et caractérisation d'antennes imprimées pour systèmes Ultra Large Bande impulsionnels", Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Février 2006.
- [37] Trong Duc Nguyen, " Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive", Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur de L'Université de Grenoble, Octobre 2012.